



Universidad  
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA  
ELECTRÓNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

# ANÁLISIS Y MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Autor: Carolina Morente Fernández

Tutor: Jorge Pleite Guerra

Director: Jorge Pleite Guerra

Leganés, Febrero de 2015



# Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible de no haber contado con el apoyo de las personas tan importantes que me acompañan en mi día a día, proporcionándome las fuerzas e ilusión que me llevan a conseguir éxitos como el presente trabajo. Entre ellos es imprescindible destacar tanto a mi familia como amigos más cercanos, y como no, a la persona que en el último año se ha convertido en mi apoyo principal, mi mejor amigo y amor.

Por supuesto no me puedo olvidar de las grandes personas que me acompañan en mi vida profesional actual y de su gran aporte a la hora de facilitarme todas las condiciones necesarias, tanto a nivel de tiempo como de energía, para que este TFG fuera realizado con éxito

Así mismo agradezco a Jorge Pleite Guerra la oportunidad de poder realizar este Trabajo Fin de Grado, proporcionándome la información inicial acerca del tema, así como la implicación en su labor como profesor en la asignatura que me permitió coincidir con él y que en consecuencia me impulsó a elegirle como tutor de este TFG.

# Resumen

En el presente proyecto se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las baterías aplicadas a vehículos eléctricos, las baterías de ión-litio, partiendo desde las características que poseen hasta el modo en el que reaccionan ante distintas características de funcionamiento, centrándonos en su aplicación en vehículos eléctricos.

El principal objetivo de este análisis es conocer el comportamiento que tendrán las baterías de ión-litio y así poder crear una representación del sistema que sea capaz de reproducir su actuación lo más eficientemente posible, lo que se conoce como modelo equivalente. Para ello se estudiarán los modelos más significativos y eficaces propuestos en los últimos años, centrándonos en el estudio de los fenómenos que condicionan el comportamiento de la batería, y en la identificación de los parámetros que pueden reproducir en el modelo la influencia de estos fenómenos. Una vez localizados los diversos factores de influencia y sus posibles representaciones dentro del modelo, se compararán las distintas soluciones, sacando las conclusiones oportunas.

Finalmente, a partir de las conclusiones obtenidas, se propondrá un modelo concreto, del cual se propondrá demostrar su eficacia mediante la realización de simulaciones.

# Executive Summary

The aim of this paper is to perform an exhaustive analysis about the Lithium-ion batteries, beginning from their particular characteristics and concluding with how they react to different performance strategies, always focusing its application on electric vehicles.

The main objective of this analysis is to understand how Lithium-ion batteries behave and making it possible to create a system representation which enables to reproduce its performance the most efficient possible, also known as equivalent model. For this purpose the most significative and efficient models proposed the last few years will be studied, centring our studies on the phenomenon that determine the behaviour of the battery. It will also be identified the parameters that can reproduce in the model the influence of those phenomenon. Once the influence factors and their possible representations are located in the model, an exhaustive comparison between all the different solutions will be made, drawing appropriate conclusions.

Finally, from the obtained results, it will be proposed a specific model. This model allows proceeding with certain simulations which will demonstrate its efficiency.

# Índice general

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>IV</b>
<b>EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN/MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.2 ETAPAS DEL DESARROLLO .....	2
1.3 ENTORNO SOCIOECONÓMICO Y MARCO REGULADOR.....	4
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	6
<b>BATERÍAS DE IÓN-LITIO: CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO.....</b>	<b>7</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	7
2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	8
2.3 CARACTERÍSTICAS .....	8
2.3.1 Ventajas.....	9
2.3.2 Inconvenientes.....	9
<b>PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN EL COMPORTAMIENTO DE LA BATERÍA .....</b>	<b>11</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	11
3.2 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN .....	13
3.2.1 Tensión de la batería .....	13
3.2.2 Corriente máxima .....	14
3.2.3 Capacidad .....	14
3.2.4 Eficiencia de carga o descarga .....	14
3.2.5 Rendimiento.....	15
3.2.6 Corriente de autodescarga .....	15
3.2.7 Resistencia interna .....	15
3.3 PARÁMETROS DE INFLUENCIA.....	16

<b>MODELADO.....</b>	<b>19</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	19
4.2 TIPOLOGÍAS DE MODELADO.....	21
4.2.1 Modelado desde el punto de vista eléctrico.....	21
4.2.2 Modelado desde el punto de vista químico.....	22
4.2.3 Modelado desde el punto de vista analítico.....	23
4.2.4 Modelado desde el punto de vista estocástico .....	23
4.3 ASPECTOS RELEVANTES EN LA ELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE MODELADO .....	24
<b>ANÁLISIS DE MODELOS CONCRETOS .....</b>	<b>25</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	25
5.2 EQUIVALENTE DE THEVENIN CON PARTE TRANSITORIA.....	27
5.2.1 Caracterización de la tensión en circuito abierto E .....	28
5.2.2 Caracterización de las pérdidas de tensión .....	28
5.2.3 Caracterización de la repuesta transitoria .....	28
5.2.4 Descripción de las características térmicas .....	28
5.2.5 Conclusiones.....	29
5.3 THEVENIN CON REDES RC AÑADIDAS.....	29
5.4 CONSIDERACIÓN DEL FENÓMENO DE HISTÉRESIS .....	32
5.4.1 Modelo del proceso de histéresis .....	33
5.4.2 Validación y conclusiones.....	34
5.5 ANÁLISIS DE MODELOS EN FUNCIÓN DE SU APLICACIÓN .....	35
5.5.1 Modelo electroquímico basado en impedancia .....	35
5.6 MODELO PRIMER ORDEN EN TIEMPO REAL .....	36
5.6.1 Comparación de modelos.....	37
5.6.1 Proposición de modelo run-time .....	37
5.7 ESTUDIO TÉRMICO CON USO DE MODELO .....	41
5.7.1 Análisis experimental .....	42
5.7.2 Conclusiones.....	42
5.8 ESTUDIO TÉRMICO. ENFOQUE QUÍMICO.....	43
5.9 ANÁLISIS MEDIANTE RED NEURONAL .....	48
5.9.1 Características de las redes neuronales .....	48
5.9.2 Modelo NIO.....	48
5.9.3 Modelo NARX .....	49
5.9.4 Pruebas experimentales.....	49
5.9.5 Funcionamiento.....	49
5.9.6 Conclusiones.....	50
5.10 CONCLUSIONES.....	50
<b>SOLUCIÓN PROPUESTA .....</b>	<b>53</b>
6.1 INTRODUCCIÓN.....	53
6.2 MARCO DE TRABAJO .....	54
6.3 ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN .....	57
6.4 ADAPTACIÓN MODELO UNITARIO/MODELO BATERÍA.....	66
<b>TRABAJOS FUTUROS Y MEJORAS .....</b>	<b>70</b>
7.1 TRABAJOS FUTUROS Y MEJORAS.....	70
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO A: PRESUPUESTO .....</b>	<b>76</b>
1. ORGANIZACIÓN DEL TIEMPO .....	76

## Índice general

2.	PRESUPUESTO DEL TRABAJO FIN DE GRADO .....	77
----	--	----



# Índice de figuras

Fig. 1- Márgenes de trabajo de una batería. ....	15
Fig. 2- Modelo Thevenin con RC, propuesto en [12]. ....	27
Fig. 3- Modelo Thevenin con varias redes RC, propuesto en [13]. ....	29
Fig. 4- Representación tensión en circuito abierto en periodo de reposo [13]. ....	31
Fig. 5- Pruebas de validación correspondientes a [13]. ....	32
Fig. 6- Relación entre tensión en circuito abierto y estado de carga en [15] ....	33
Fig. 7- Relación entre tensión de histéresis y estado de carga en [15]. ....	33
Fig. 8- Modelo electroquímico basado en impedancias [16]. ....	36
Fig. 9- Modelo para la medición en tiempo real [19] ....	37
Fig. 10- Voltaje de la batería en caso de descarga pulsada en [19] ....	39
Fig. 11- Representación de una celda para su análisis térmico [20]. ....	42
Fig. 12- Representación de una celda para su análisis térmico [20]. ....	44
Fig. 13- Modelo neuronal NIO en [22]. ....	49
Fig. 14- Modelo neuronal NARX en [22]. ....	49
Fig. 15- Flujo de trabajo. ....	55
Fig. 16- Modelo seleccionado como solución, propuesto en [23]. ....	57
Fig. 17- Modelo de la solución reestructurado ....	58
Fig. 18- Gráficas que definen el modelo propuesto ....	59
Fig. 19- Modelo electroquímico basado en impedancias ....	67
Fig. 20- Esquemático de m=2 baterías en serie. ....	67
Fig. 21- Esquemático simplificado de m=2 baterías en serie ....	67
Fig. 22- Esquemático de n=2 baterías en paralelo ....	68
Fig. 23- Esquemático simplificado de n=2 baterías en paralelo ....	68
Fig. 24- Esquemático de un módulo de baterías. ....	68



# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción/Motivación y objetivos

La implantación de las baterías de litio en aparatos eléctricos ha aumentado de forma muy notable en los últimos años. Su uso se ha extendido en numerosas aplicaciones, como son dispositivos móviles, ordenadores portátiles y sistemas de transporte. En lo que respecta a los vehículos, inicialmente su estructura era híbrida, combinando electricidad con otras fuentes de energía, usualmente derivados del petróleo. Sin embargo, con el tiempo los vehículos han pasado a ser totalmente eléctricos. El aumento de la complejidad de los dispositivos donde se implantan dichas baterías ha conllevado a la necesidad de un aumento de precisión en la estimación de su comportamiento. Además se ha desarrollado la necesidad de poder apreciar el comportamiento de la batería en tiempo real. Analizar un sistema en tiempo real implica ser capaz de conocer su comportamiento en el instante en el que está operando, sin necesidad de ninguna otra condición extra que lo impida, como puede ser la necesidad de un periodo de tiempo para que el sistema se estabilice.

Para cubrir estas necesidades de la industria, en los últimos años se han desarrollado numerosas investigaciones cuyo objetivo común ha sido encontrar un sistema equivalente que sea capaz de representar de la forma más precisa el comportamiento de una batería de ión-litio.

En este proyecto se revisarán los estudios más relevantes con el fin de comparar las soluciones que proponen y quedarnos con las más eficaces y eficientes y así poder encontrar un modelo que reproduzca el comportamiento de la batería con la máxima precisión posible.

Más adelante se explicarán con mayor detalle las características y funcionamiento de las baterías de ión-litio. Se detallará también el estudio llevado a cabo para la propuesta del modelo equivalente final, proporcionando tablas y gráficas que permitan una fácil comprensión durante su desarrollo.

## 1.2 Etapas del desarrollo

La primera fase en el desarrollo del trabajo resumido en la presente memoria se basa en la búsqueda de información general acerca del tema en cuestión, las baterías de ión-litio y los vehículos eléctricos. Analizamos los motivos de la elección de este tipo de baterías entre las otras tipologías existentes, centrándonos en las principales ventajas que poseen.

Se estudian en profundidad su estructura y funcionamiento, lo que conlleva el uso de conocimientos químicos, referentes a los compuestos y cómo reaccionan entre ellos, además de los conocimientos energéticos y eléctricos que son necesarios para analizar el balance y manejo de la energía/electricidad que entra en juego. A partir de estos factores se definen los parámetros que caracterizan a las baterías de esta tipología, argumentando minuciosamente cada característica que conllevan dichos parámetros. Una vez se conocen los parámetros se investiga cómo condicionan el comportamiento que vaya a tener la batería.

En el momento en el que disponemos de todo el conocimiento acerca de las baterías de ión-litio como componente, la investigación pasa a una segunda fase, en la cual toma el papel principal la búsqueda de un sistema equivalente capaz de reproducir el comportamiento de la batería, lo que comúnmente se denomina modelo equivalente. Inicialmente se hace una exhaustiva búsqueda las distintas formas posibles a la hora de realizar el modelado de una batería, en función del ámbito al que pertenezcan los conceptos que se apliquen.

Posteriormente inicia la profunda recopilación y entendimiento de los modelos más relevantes propuestos a lo largo de la historia de la investigación de las baterías de litio. Es muy importante transmitir la laboriosidad y complejidad de este largo proceso. Uno de los motivos es que se trata de un tema muy específico y por tanto la información se halla en un círculo muy pequeño, artículos muy determinados publicados de forma aleatoria. Como fuente de recopilación de estos artículos hemos utilizado la biblioteca interactiva propia de revista científica IEEE [1].

---

Otra causa de la complejidad, que otorga mayor mérito al presente trabajo, tiene su raíz en que casi la totalidad de la documentación hallada estaba desarrollada en lengua inglesa, lengua de la que inicialmente no se tenía un conocimiento tan avanzado, mucho menos en el vocabulario técnico propio de los temas analizados. La gran ventaja ha sido la notable evolución en el conocimiento de la lengua frente al espacio temporal que ha supuesto. Finalmente destacar como factor de complejidad el gran abanico de ámbitos conceptuales tratados en profundidad, comprendiendo desde la física, hasta la química, pasando por conceptos térmicos y relativos al control de procesos, como un integrador proporcional, como se detallarán más adelante.

Como punto final de esta segunda fase de investigación, a partir de los modelos se lleva a cabo la elección del modelo en función del objetivo final, la previsión de energía que proporcionará la batería integrada al vehículo eléctrico en cuestión.

La considerada tercera fase del desarrollo se basa en la propuesta de la solución ante el problema planteado, el modelado de una batería aplicada a un vehículo eléctrico. Se analiza el marco de trabajo en el cual aplicaremos y validaremos la solución dada para posteriormente poder definir la arquitectura del modelo equivalente propuesto, definiendo el valor de cada uno de sus parámetros. Finalmente se realizará la comprobación de la solución propuesta en la que se hará uso de un software de simulación, LTspice IV.

Conocer el software utilizado requiere de formación y dedicación para coger soltura en su uso. El tiempo que se invierta en esta fase se verá recompensado cuando llegado a ese punto la experiencia facilite en gran parte el trabajo a realizar.

A lo largo de todas las fases es posible la realización de mejoras en cuanto a búsqueda de información, o actualización de ésta, además de mejora de precisión mediante el uso de materiales y técnicas más precisas y avanzadas, tareas demasiado avanzadas, en cuanto a la amplitud temporal y de dedicación, para este trabajo fin de grado. Se proponen trabajos futuros a llevar a cabo sobre este trabajo intentando promover una mayor precisión en los resultados obtenidos, y un continuo avance, tal y como lo hace el tema de las baterías de ión-litio en vehículos eléctricos.

Este trabajo fin de grado termina con el desarrollo de una memoria que recoge todo el trabajo de investigación y desarrollo realizado.

La estimación del presupuesto asignado a la realización de este trabajo fin de grado es detallada en el [ANEXO A](#).

## 1.3 Entorno socioeconómico y marco regulador

En la actualidad, la tecnología desempeña un papel fundamental en nuestras vidas, se encuentra en todos los ámbitos que podemos imaginarnos, tanto en la parte personal como laboral, cualquier tarea que se quiera realizar necesitará de ayuda tecnológica, o por el contrario, se realizará más eficientemente al integrarle un matiz tecnológico. En particular, el uso y almacenamiento de energía ha adquirido un rol imprescindible en la sociedad. Cualquier dispositivo necesita una fuente de energía para su funcionamiento y por tanto, cuanto más presente está la tecnología, más dispositivos hay que requieran energía, aumentando cuantiosamente la necesidad de mejoras en el almacenamiento y aportación de energía.

En el caso de los medios de transporte la fuente de energía más extendida es el petróleo, una fuente de energía no renovable, y por tanto limitada. Además, los derivados del petróleo cuentan con la desventaja de que provocan contaminación atmosférica. Si unimos estos inconvenientes al gran número de vehículos que existen obtenemos una imperiosa necesidad de aplicarles otra fuente de energía. Así nace el creciente interés de los últimos años por los vehículos eléctricos como alternativa a los típicamente alimentados por carburantes petrolíferos, tales y como los que dispone la mayoría de la sociedad.

Existen numerosas investigaciones para el desarrollo y mejora de los vehículos eléctricos, pero en todos ellos el punto de inflexión, en el cual todavía es posible mejorar, es la obtención, almacenamiento y control de la energía que permite al vehículo su funcionamiento. En el mercado se está investigando la aplicación de distintas estructuras como fuentes de energía eléctrica, siendo las baterías de ión-litio las elegidas debido a su gran capacidad de almacenamiento de carga por unidad de masa. En [2] se detallan en profundidad los motivos que promueven el estudio a nivel de estado de las baterías en vehículos eléctricos. De aquí el estudio de las baterías de ión-litio en el presente documento, a fin de poder saber cómo se comportará el vehículo eléctrico en el que se apliquen.

En cuanto a las regulaciones que aplican a los vehículos eléctricos hay que destacar que al tratarse de un tema relativamente novedoso no posee un gran historial de regulaciones. Es un sector que ha empezado a tener relevancia en la sociedad en los últimos años, estando actualmente en pleno auge. Una evidencia es la aprobación de un conjunto de modificaciones legislativas en los últimos años relativas a las estaciones de carga de las baterías de ión-litio y que son detalladas en las líneas que prosiguen.

- Instrucción Técnica Complementaria, ITC, del Reglamento electrotécnico de baja tensión., la ITC-BT-52 “Instalaciones con fines especiales. Infraestructura para recarga de vehículos eléctricos” publicada el pasado mes de Diciembre. Esta Instrucción será la encargada de regular cada aspecto relativo a las instalaciones destinadas a la recarga de vehículos eléctricos. El Boletín Oficial del Estado publicado el 31 de Diciembre [3], permite conocer todo su contenido.

- Directiva Europea publicada el 28 de Octubre relativa a la creación de puntos de recargas de vehículos eléctricos, la cual ha incentivado la publicación de la Instrucción antes indicada.
- Real Decreto a los gestores de carga aprobado en el 2011. Regula los gestores de carga como elementos capacitivos para la carga de vehículos eléctricos.

Estas legislaciones están vinculadas a los sistemas encargados de la carga de los vehículos eléctricos lo que se puede vincular indirectamente con las baterías de ión-litio, pero en referencia a las baterías en sí y su aplicación en los vehículos eléctricos no existe más normativa que la recogida en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión [4].

Es importante destacar que las medidas legislativas que se han tomado en los últimos años tienen como objetivo fundamental el promover el uso de los vehículos eléctricos. Resulta necesario destacar el plan MOVELE, una medida que tomó el Estado Español con el fin de impulsar la introducción y uso del vehículo eléctrico en la sociedad española.

## 1.4 Estructura de la memoria

Con el fin de que este documento sea de fácil lectura, ha sido dividido en capítulos, incluyendo un pequeño resumen a continuación de cada uno de ellos. Al finalizar esta introducción, donde se informa sobre la causa y objetivo de la realización de este documento, además de la estructura y contenido que poseerá, se continúa con una aclaración detallada sobre qué es una batería de ión-litio, explicando sus características y modo de funcionamiento. Inmediatamente después se acompañará con un segmento en el que se indiquen tanto los parámetros que caracterizan la batería como los parámetros que influyen su comportamiento, detallándose cada uno de ellos.

A continuación, se darán a conocer los tipos de modelados que se pueden aplicar a una batería para conseguir su sistema equivalente, y como consecuencia los tipos de modelos que se pueden obtener. Una vez conocidas las distintas posibilidades se analizarán en profundidad una serie de artículos y estudios realizados en los últimos años y que han sido relevantes debido a la capacidad de sus autores, comparando las opciones de modelado e identificación de parámetros que ofrecen y obteniendo las conclusiones pertinentes.

Más adelante, y teniendo en cuenta las conclusiones tomadas tras el análisis, se realizará la propuesta de un modelo determinado, válido para predecir el comportamiento de cualquier batería de ión-litio, suponiendo el conocimiento previo de unas características concretas. Como incentivo para posibles trabajos futuros y mejoras se propondrán otros puntos de vista que pueden tomarse en la toma de decisiones y variables que en ocasiones se asumen a lo largo del documento, permitiendo que otros estudiantes retomen el trabajo desde un punto más avanzado y poder ofrecer facilidades a la hora de realizar un nuevo proyecto.

Al finalizar el documento se incluyen los anexos con información adicional relacionada con el presupuesto necesario para realizar el trabajo propuesto, además de las referencias tenidas en cuenta a lo largo del documento para hacer posible su desarrollo.



# Capítulo 2

## Baterías de ión-litio: características y funcionamiento.

### 2.1 Introducción

Antes de empezar vamos a definir qué es una batería eléctrica. Se denomina como batería eléctrica a un sistema capaz de almacenar energía en forma química que posteriormente, es capaz de transformar en energía eléctrica. Los materiales que conforman una batería poseen unas propiedades concretas que motivan la acumulación de energía química, además, se encuentran dispuestos entre ellos favoreciendo que se produzcan los procesos químicos que tienen lugar en su interior. La estructura física más pequeña que posee estas propiedades se le denomina celda, y es la unidad básica que se considera en el ámbito de las baterías. Más adelante se detalla en profundidad cómo está formada una celda y su principio de funcionamiento.

Es importante tener en cuenta que el término batería no está concretamente definido. En ocasiones se usa el término “batería” para hacer referencia a un conjunto de celdas conectadas en serie, usando el término “módulo de baterías” para la asociación de éstas en paralelo. En otros casos, el término “batería” es usado para cualquier conjunto de celdas galvánicas, sin hacer distinción entre si éstas están conectadas en serie o en paralelo.

## 2.2 Principio de funcionamiento

Una celda se define como un dispositivo electroquímico cuya estructura está formada por dos electrodos y un electrolito, áreas que vamos a explicar a continuación. El electrolito es una sustancia en la que se encuentran los electrodos y que se caracteriza por tener gran densidad de iones, los cuales serán muy necesarios para que se produzca la reacción química principal, detallada más adelante. Los electrodos están compuestos por materiales semiconductores cuya función es proporcionar las características químicas que favorecen las reacciones que tienen lugar. Se ha de distinguir entre electrodo positivo, denominado como ánodo, y electrodo negativo, denominado como cátodo. Cada electrodo será considerado como ánodo o cátodo en función de la dirección que tenga el tráfico de cargas entre ellos, y por tanto la función que tengan en la reacción química que tiene lugar. Más adelante se concretarán estos aspectos químicos.

Partimos de que la celda tiene una energía almacenada en forma química. Esta energía corresponde a las cargas que poseen los iones de la solución que hemos denominado electrolito. Esta energía química se transforma en energía eléctrica debido a la reacción química de oxidación-reducción (REDOX) que tiene lugar entre los electrodos. El ánodo, es susceptible a cargarse positivamente y tener la capacidad de atraer cargas negativas, o lo que es lo mismo iones negativos o aniones. De igual forma el cátodo es capaz de cargarse negativamente y así atraer iones positivos o cationes, de ahí el nombre del electrodo. Es necesario un material que proporcione los iones que permitan cargarse a los electrodos, de aquí la función del electrolito.

El que una batería tenga unas características u otras de comportamiento depende en gran medida del material del que estén compuestos los electrodos y el electrolito. Estos materiales serán los que definan que una batería se considere de un tipo concreto. Las baterías en las que se va a centrar este estudio son las denominadas baterías de ion-litio, nombre que reciben debido a que es el litio el compuesto que proporciona los iones. La elección del litio como sustancia base del electrolito se debe a que el litio es un compuesto cuya separación de iones es fácilmente realizable siempre y cuando se le proporcione la energía necesaria. Dicha energía viene aportada por la fuente de alimentación a la que se conecta la batería para su carga.

En conclusión, al conectar la batería a la fuente de alimentación se producirá la separación de iones que se hallan en el electrolito, los cuales se transferirán entre los electrodos como producto de la reacción de oxidación-reducción, fenómeno denominado como transferencia de carga.

## 2.3 Características

Las baterías de ión-litio poseen unas características que las hacen muy superiores a las baterías anteriores con compuestos diferentes como son las de níquel-cadmio. A

---

continuación se enumeran una serie de ventajas e inconvenientes que poseen las baterías de ión-litio con respecto a otro tipo de baterías existentes en el mercado actual.

### 2.3.1 Ventajas

- Reducción del peso por unidad de los dispositivos: más ligeras que sus equivalentes de níquel cadmio o de níquel hidruro.
  - Los electrodos de las baterías de ión-litio de este metal y de carbono son mucho más ligeros reduciendo considerablemente el peso por una misma cantidad de carga almacenada.
  - El litio es un metal muy reactivo: posee una gran cantidad de energía potencial almacenada entre sus átomos o enlaces atómicos contenida en muy poco espacio pudiendo reducir el volumen de las baterías para una misma cantidad de carga en comparación con otro tipo de baterías.
  - Comparación en términos de energía:
    - batería de ión-litio: 150 vatios hora de electricidad por kilogramo de peso de la batería;
    - una pila ordinaria de metal de níquel hidruro: entre 60 y 70 vatios/hora, llegando a un máximo de 100 vatios/hora.
    - baterías ácidas de plomo: 25 vatios por hora por kilogramo de peso.
- Pérdida de carga muy pequeña: una batería de ión-litio pierde como máximo un 5% de su energía acumulada, una de níquel hidruro un 20% si no se recarga. Las baterías de ión-litio no tienen lo que se denomina como efecto memoria, es decir, poseen una elevada resistencia a las descargas cuando éstas no son utilizadas durante un prolongado espacio de tiempo. Las baterías corrientes hay que descargarlas, las de ión-litio no.
- Gran número de ciclos de carga y descarga: son capaces de soportar gran número de ciclos de carga y descarga sin que se vea afectado su rendimiento.

### 2.3.2 Inconvenientes

Sólo pueden usarse por un tiempo limitado, siendo un problema para su almacenamiento. Como solución se introduce el líquido necesario en el momento de la instalación de la batería, empezando su ciclo de vida en ese momento.

El efecto de las temperaturas elevadas reduce la energía acumulada por la batería y afecta al rendimiento de las baterías de ión-litio. Como solución se emplean otros

materiales en la carcasa del dispositivo, en las láminas productoras de energía de su interior o la utilización de una combinación diferente de metales o aleaciones junto al de litio minimiza en gran medida o anula la posibilidad de descarga no deseada

# Capítulo 3

## Parámetros que caracterizan el comportamiento de la batería

### 3.1 Introducción

Una vez descrito el principio de funcionamiento de la batería, es más fácil comprender la definición e influencia de los distintos parámetros que caracterizan una batería de litio y que serán los que determinen su comportamiento.

- **Voltaje de la batería:** tensión entre los bornes de la celda, definida por el potencial de reducción del cátodo. Normalmente está definida entre 1v y 4v, tensión mínima,  $V_{MIN}$ , y tensión máxima,  $V_{MAX}$ , respectivamente.
- **OCV, tensión en circuito abierto:** define el voltaje de la batería cuando ésta se encuentra en reposo y en circuito abierto.
- **Voltaje teórico o estándar:** depende de los materiales con los que esté construida la batería. Se calcula a partir de los voltios estándares de los electrodos.
- **Capacidad de carga:** es la capacidad que es capaz de almacenar la batería. Depende de la cantidad de material reactivo que contenga la celda. Representa la

cantidad de electricidad que entrará en juego en la reacción REDOX. Se mide en la corriente en amperios que puede suministrar la batería en una hora en el proceso de descarga, expresados mediante la unidad amperio-hora, Ah.

- **Capacidad eléctrica:** es la capacidad que se mide en referencia al tiempo de carga y de descarga.
- **Resistencia interna:** es la resistencia que opone la propia celda como material ante el flujo de corriente.
- **Corriente:** definida por la cantidad de flujo de cargas por unidad de tiempo, en amperios, A. También se puede expresar en función de la capacidad de carga, de forma que si una batería tiene una capacidad de carga en amperios-hora, como pueden ser 5 Ah, una corriente de una intensidad concreta expresada como 1C indicará el nivel de corriente que consiga carga la batería en una hora, en este caso 5 amperios.
- **Corriente máxima de carga o descarga:** corriente máxima a la que se puede cargar o descargar la batería. Recomendada por el fabricante.
- **Corriente o índice de autodescarga:** parte de corriente efectiva que se pierde aunque el dispositivo no esté en funcionamiento.
- **W:** Energía que puede suministrar la batería. Depende de la tensión que sufra la batería, el perfil de corriente que haya y la cantidad de carga que almacene, capacidad.
- **Energía específica:** cantidad de energía que puede suministra un elemento en relación con su masa. Depende del voltaje y capacidad estándares.
- **Densidad de energía:** cantidad de e energía que puede suministra un elemento en relación con su volumen. Depende del voltaje y capacidad estándares. Es una de las mayores ventajas de las baterías de litio.
- **Potencia específica:** máxima potencia que puede suministrar un elemento en relación con su masa.
- **Intervalo térmico de trabajo:** determina el rango de temperaturas en los que la batería función correctamente.
- **Eficiencia en régimen de carga o descarga [%]:** es un parámetro que señala la cantidad de carga que suministra una batería en relación a la carga que ha recibido anteriormente, expresado en porcentaje.
- **SOC, estado de carga:** Capacidad disponible de la batería en función de su capacidad nominal. Se expresa en porcentaje.

- **DOD, Profundidad de descarga, o SOD, Estado de descarga:** capacidad extraída de una batería en función de su capacidad nominal. Es la variable complementaria al estado de carga.
- **SOH, estado de salud:** Condición o capacidad de funcionamiento actual de la batería en función de la capacidad nominal o inicial (nueva). No hay una forma de cálculo normalizada.
- **Ciclos permitidos y reales de carga-descarga, n:** cada batería viene definida por el número de ciclos de carga-descarga que será capaz de llevar a cabo correctamente, que no tienen por qué corresponderse con los ciclos que vaya a ser capaz de sufrir en la práctica, es más, no suelen corresponderse.
- **Rendimiento:** relación entre la energía eléctrica que suministra una batería y la que es necesaria para cargarla de nuevo. Viene influenciado por la velocidad a la que sea cargada la batería y el perfil de corriente que sufra en la descarga.

Para saber qué tipo de batería es la adecuada para una aplicación concreta, es necesario valorar los parámetros enumerados anteriormente y así saber qué batería concreta se comportará tal y como se necesite para la aplicación.

## 3.2 Parámetros de caracterización

### 3.2.1 Tensión de la batería

Uno de los parámetros que más caracterizan el comportamiento y cualidades de una batería es la tensión que posea. La tensión de una batería viene dada por el material del que estén fabricados los electrodos. Es muy importante controlar la tensión que sufre cada celda, no rebasando nunca los límites  $V_{MAX}$  y  $V_{MIN}$  ya que en tal caso la batería puede estropearse físicamente o quedar inservible. Para solucionar esto, todas las celdas de Li-ion incluyen circuitos especiales de control, los cuales en cada momento miden la tensión y la limitan de forma que no se rebase ni  $V_{MAX}$  ni  $V_{MIN}$ , limitando la corriente al llegar a tales puntos de tensión.

Desde el punto de vista químico la tensión depende de las sustancias reactivas que se encuentran en el interior de la batería, el voltaje será menos cuanto menor sean los reactivos, esta relación viene dada por la ecuación de Nernst, mostrada a continuación, de la que deducimos que la tensión disminuye de forma brusca inicialmente y luego disminuye más lentamente. Además podemos apreciar que, en lo que corresponde a la temperatura, cuanto mayor sea la temperatura a la que se encuentra la celda, menor será la tensión que posea.

$$E = E_o - \frac{RT}{nF} \ln \frac{C^c x D^d}{A^a x B^b}$$

### 3.2.2 Corriente máxima

Cada celda, en función de cómo esté fabricada, es capaz de permitir que circule por ella una corriente de magnitud menor o igual a un determinado valor, denominado corriente máxima, que viene impuesto por el fabricante. En caso de que la corriente que circule por la celda sobrepase su valor máximo, los daños que sufrirá la celda serán irreversibles, llegando hasta el punto de posibilidad de explosión.

Para evitar tales riesgos, el circuito de control de la celda, además de limitar la tensión, será capaz de monitorizar la corriente que circule en cada instante y, en caso de llegar a la magnitud máxima, cortará el paso de corriente, paralizando así el funcionamiento de la batería.

### 3.2.3 Capacidad

Las baterías se podría decir que contienen una cantidad de electricidad concreta, la cual depende de la cantidad de reactivos que contenga y viene denominada mediante la capacidad.

### 3.2.4 Eficiencia de carga o descarga

Una batería ideal tendría una eficiencia de un 100% pero en la práctica siempre es menor, ya que este valor se ve influenciado por las pérdidas que haya, además de depender de la temperatura, del tipo de batería que sea y del índice de carga.

Al cargar una batería entre unos valores de SOC de 20 y 80%, la eficiencia es casi máxima, tal y como se muestra en la ilustración. En [5] encontramos un esquema que nos facilita el entendimiento de los márgenes de funcionamiento de una batería en función de su estado de carga, mostrado en la figura 1.





Fig. 1- Márgenes de trabajo de una batería.

### 3.2.5 Rendimiento

Nunca será del 100% ya que depende de la eficiencia energética pero a su vez incluye las pérdidas debidas a la autodescarga, a la resistencia interna o a la velocidad de descarga.

Cuanto más lentas sean la carga y la descarga mayor será el rendimiento, ya que las pérdidas serán menores.

### 3.2.6 Corriente de autodescarga

El fenómeno de la autodescarga, como ya se ha comentado, es muy leve en las baterías de ión litio. Este fenómeno consiste en una pequeña descarga de la batería cuando esta no está en funcionamiento, solo debido al paso del tiempo. En caso de que la temperatura a la que opera el dispositivo sea muy alta o baja este fenómeno se ve acentuado.

### 3.2.7 Resistencia interna

Como cualquier material por sus propiedades, los compuestos de una batería ofrecen una resistencia al paso de electricidad, oposición denominada como resistencia interna. Este parámetro puede descomponerse a la vez en dos tipos de resistencias, ohmica y de polarización.

- **$R_{ohmica}$**  ( $R$  de electrodos electrolito y frontera entre ambos). Una mayor resistencia ohmica provoca una menor tensión en la batería, un menor tiempo de descarga y menor potencia disponible. Su modelado proporciona valores para que al gestionar la batería se haga un mejor uso de las celdas del conjunto, lo que puede llevar a un mayor ciclo de vida
- **$R_{polarización}$**  (depende de la polarización química y de la concentración de electrolito).

### 3.3 Parámetros de influencia

El proceso de funcionamiento de una batería no es constante, si no que se ve afectado por distintos motivos. En función de una serie de circunstancias, tanto externas al dispositivo, como internas, ésta tendrá un determinado rendimiento.

Los parámetros que condicionan el funcionamiento son los mostrados a continuación:

- **Temperatura:** influye directamente en las características de los componentes químicos, afectando así a la reacción REDOX, la cual es la que determina las características de la transformación de energía. Disminuye la tensión, siguiendo la ecuación de Nernst, detallada anteriormente, además de la capacidad útil de la batería. Estos dos factores provocan un menor nivel de energía almacenada.

En una batería formada por un gran número de celdas existe diferencia de  $T$  entre las mismas celdas (por ejemplo las del medio tienen mayor  $T$  que las de los extremos ya que no tienen ventilación). Y como la  $T$  hace que varíe el comportamiento de una celda, éstas no tendrán el mismo comportamiento, y contribuirán a disminuir el ciclo de vida del conjunto total. Debido a esto son necesarios modelos térmicos.

- **SOH:** estado de salud, o lo que es lo mismo, vida útil del dispositivo, distinta a la capacidad nominal por los ciclos de carga o descarga que ya haya sufrido. El estado en el que se encuentra la batería debido al deterioro temporal que haya sufrido. Una batería que ha funcionado ya durante un periodo de tiempo poseerá unas características de funcionamiento/eficiencia menores que una nueva. El estado de salud (SOH), o también denominado vida útil, determina el envejecimiento que ha sufrido un dispositivo de litio, dando una idea del estado general de la batería. El grado de envejecimiento que posea la batería determinará la eficiencia a la hora de ofrecer sus prestaciones específicas, en referencia a sus características nominales, las características que poseería la misma batería en caso de no haber sido usada.

Se considera envejecimiento de una batería al deterioro irreversible, no compensable en el proceso de carga, que haya sufrido la batería. Al ser

dispositivos electroquímicos el deterioro será de tipo químico, concretamente un cambio en la composición de las sustancias reactivas.

El grado de envejecimiento es directamente proporcional al número de cargas y descargas que haya sufrido la batería, además de la forma en la que éstas se produzcan. Cuanto más intensas sean los procesos de descarga y carga mayor será el envejecimiento. Un mal uso de la batería, en lo que se refiere a tiempo y temperatura de funcionamiento, también puede provocar una disminución del estado de salud de la batería.

Los ciclos de funcionamiento que sea capaz de cumplir la batería dependerán del tipo de descarga al que sea sometida. En concreto la DOD y el SOH poseen una relación logarítmica, los ciclos que será capaz de cumplir la batería disminuirán exponencialmente cuanto mayor sea la profundidad de descarga.

Para alargar al máximo la vida útil de la batería se pueden llevar a cabo un conjunto de cuidados y reglas de uso que minimicen el envejecimiento sufrido por la batería. Un requisito fundamental es establecer los límites entre los que opera la batería, no rebasándolos nunca ya que puede causar daños importantes.

Por otro lado, para controlar los procesos de carga y descarga conviene utilizar cargadores inteligentes, capaces de reducir la tensión límite soportada en el proceso de carga, dando lugar así a unos ciclos de carga parciales. Además los cargadores inteligentes disminuyen la velocidad de carga al proporcionar una corriente de menor amperaje. Esto es debido a que, por sus propiedades químicas, existe una velocidad máxima a la cual los iones de litio pueden situarse en el ánodo. Si por el contrario, los iones acceden con mayor rapidez, algunos se depositarán en la superficie del cátodo, sin llegar a formar parte de él.

Finalmente destacar que el equilibrado de las celdas que componen la batería es muy importante también a la hora de alargar su vida útil, con el fin de que todas las celdas trabajen en circunstancias lo más homogéneas posibles, tanto de temperatura como de tensión o corriente, y ninguna sea sometida a acciones que la deterioren más notablemente.

Una batería deja de ser usable cuando su capacidad útil llega a ser el 80% de la capacidad inicial. Por ejemplo, una batería con una capacidad de 100Ah dejará de ser útil cuando su capacidad útil tenga un valor de 80Ah.

- **SOC:** el funcionamiento de una batería no depende solo de las entradas del circuito (condiciones que se le apliquen de tensión o corriente), si no que depende fuertemente del estado inicial en el que se encuentre la batería, en lo referente a la carga que posea.
- **Tipos de descargas:** más intensas o más continuas y leves.

En los siguientes apartados se analizará más en detalle cómo influyen concretamente estos parámetros.

---



# Capítulo 4

## Modelado

### 4.1 Introducción

Las baterías de ion-litio son muy usadas en la actualidad en distintos tipos de dispositivos, pero para poder ser incorporadas ha de conocerse su comportamiento y cómo reaccionan según las circunstancias en las que se encuentren, apareciendo la necesidad de crear un modelo de las baterías que represente el comportamiento que tenga el dispositivo. A lo largo de los últimos años se han realizado distintos modelos, llegando a reproducir en algunos casos mejor el comportamiento de la batería que en otros. Hay que destacar que inicialmente se empezó realizando modelados de una única celda, pero con el tiempo y la evolución de las baterías de ión-litio surgió la necesidad de modelar conjuntos completos, formados por un grupo de celdas, que en lo referente a aplicaciones a vehículos eléctricos se trata de un gran número de ellas, incluso centenares. Por esa misma razón este análisis de modelos se centrará inicialmente en el estudio de modelos aplicables a una única celda, pasando posteriormente al modelado de un conjunto de celdas.

Para obtener la carga útil de la batería, para controlarla y mantener su tensión óptima y para aumentar su tiempo de vida, se necesita saber el estado de carga en el que se encuentra, o lo que es lo mismo, la carga que dispone en cada momento.

Uno de los métodos usado en el modelado de conjuntos de celdas es el modelado individual de cada celda y su posterior unión, o expresado de otra manera, tomando como unidad funcional de modelado una única celda. El principal inconveniente de éste método recae en la incapacidad de modelar los detalles de funcionamiento debidos a la influencia de unas celdas sobre otras. Debido a dicha desventaja, posteriormente se ha realizado el modelado de los conjuntos de celdas tomando como unidad funcional un conjunto de dispositivos o sistemas, permitiendo modelar la influencia que ejercen unas celdas en otras y por tanto una mayor exactitud en la reproducción del comportamiento de la batería.

A fin de conseguir el sistema equivalente de una batería, el cual predice el comportamiento de ésta, lo primero es saber el comportamiento real que tiene dicha batería e identificar los componentes equivalentes a cada detalle del funcionamiento. El objetivo del modelado es que, al simular el modelo equivalente determinado, la respuesta que obtengamos sea lo más exacta a la respuesta obtenida usando la batería. Esta precisión es muy importante para saber cómo se comportará exactamente una batería y así poder hacer uso de ellas en distintas aplicaciones.

Al ser un dispositivo electroquímico, el modelado de una batería puede realizarse tanto desde el punto de vista eléctrico como desde el punto de vista químico. El modelado eléctrico de una batería consiste en obtener un circuito eléctrico, que tenga la misma respuesta que la batería, hallando sus correspondientes parámetros. El modelado eléctrico es el más extendido, ya que el modelado químico es un proceso más complejo basado en las reacciones químicas que se producen en la batería, que como ya hemos indicado anteriormente, se trata fundamentalmente de una reacción redox y por tanto, es totalmente factible realizar el modelado de la batería centrándose en el enfoque químico, analizando las características y comportamiento de los distintos componentes que conforman el dispositivo.

## 4.2 Tipologías de modelado

### 4.2.1 Modelado desde el punto de vista eléctrico

El objetivo principal del modelado eléctrico es la obtención de un circuito eléctrico y la caracterización de los elementos que lo componen, de forma que, introduciendo las entradas determinadas, en forma de corriente o niveles de tensión, como se indicará más adelante, se obtenga a partir del modelo una respuesta igual o lo más semejante posible que la respuesta que se obtendría usando la batería a modelar. La calidad del modelo obtenido vendrá dada en función de la semejanza entre la respuesta que proporcione el modelo y la respuesta del dispositivo. A mayor precisión en la respuesta del modelo, mayor validez tendrá el modelo obtenido.

Una parte fundamental es la identificación de los componentes eléctricos que formarán el circuito y la posterior cuantificación de éstos. La homología entre componente eléctrico y efecto que reproducirá se hará en el siguiente capítulo.

Existen distintas técnicas para la obtención de los parámetros del circuito equivalente, pero todas ellas se dividen fundamentalmente en dos grupos, las realizadas en el dominio del tiempo y las llevadas a cabo en el dominio de la frecuencia.

#### 4.2.1.1 Técnicas de modelado en el dominio del tiempo

Las pruebas para obtener los parámetros pueden obtenerse haciendo análisis de cómo responde el dispositivo ante distintas circunstancias a lo largo de un periodo de tiempo. A continuación se enumeran distintas técnicas de modelado en el dominio del tiempo.

- Pruebas a potencia constante
- Interrupción de la corriente o conteo de Coulomb o integración de amperios-hora:
  - o Técnica más usada para la estimación del SOC
  - o Inconvenientes: necesita conocer el SOC inicial. Además la toma de los valores genera y acumula errores de medida.
- Voltamperometría cíclica.

Los detalles de cada una de las técnicas pueden conocerse en profundidad en [6].

#### 4.2.1.2 Técnicas de modelado en el dominio de la frecuencia

Las técnicas en el dominio de la frecuencia permiten obtener el comportamiento dinámico del sistema. Las técnicas más exitosas y por tanto usadas son las listadas:

- Análisis de frecuencia en estado estacionario.
  - Espectroscopia de impedancia electroquímica.
-

De igual forma que las técnicas en el dominio del tiempo, en [6] se puede conocer el detalle de cada una de las técnicas nombradas para el dominio de la frecuencia.

La EIS consiste en una técnica que permite medir la respuesta eléctrica que ofrece un material ante una señal de excitación con una frecuencia dada, la cual usa de referencia. Se aplica al sistema una señal de excitación, con un perfil de frecuencia concreto, pudiendo realizar así amplios barridos de frecuencias y poder conocer el comportamiento tanto a altas como a bajas frecuencias.

El inconveniente que posee la EIS aparece cuando, una vez se conoce el comportamiento de la batería, en las distintas frecuencias, expresado matemáticamente, se intenta reproducir dicho comportamiento a partir de un conjunto de componentes eléctricos.

En los sistemas electroquímicos tienen lugar procesos, como la transferencia de carga o la difusión, que los componentes eléctricos tradicionales no son capaces de simular. Por esta razón, se hace uso de una serie de impedancias más complejas que puedan simular dichos procesos, enumeradas y detalladas a continuación:

- *Impedancia Warburg*: corresponde a una capa de difusión semi-infinita.
- *Elemento de fase constante CPE*: representa el comportamiento capacitivo de un material no homogéneo o la doble capa eléctrica que se da en la frontera electrodo-electrolito o en superficies muy porosas sumergidas en el electrolito.
- *Impedancia YARC*: se basa en una conexión de CPE y resistencia en serie.
- *Impedancia ZARC*: corresponde a una impedancia YARC con una resistencia paralela al CPE.

En [6] se puede encontrar más detalle acerca de las impedancias recién introducidas.

### 4.2.2 Modelado desde el punto de vista químico

Analizando la batería desde el punto de vista químico se obtienen modelos electroquímicos, basados en los componentes químicos que forman la batería y las reacciones químicas que se producen entre ellos.

Los modelos electroquímicos poseen la capacidad de calcular el balance de energía que tiene lugar en la batería, tanto la energía acumulada como la proporcionada. Sin embargo, los inconvenientes que poseen es que no son capaces de proporcionar detalles acerca del efecto de la temperatura o del envejecimiento. Además, no aportan tampoco detalle de las variaciones que se producen en la tensión de salida durante la carga de la batería, lo cual es una información muy valiosa para la correcta integración de la batería en el sistema.

Cabe destacar que debido a la reacción REDOX se producen dos procesos importantes que deberemos tener en cuenta: transferencia de carga y difusión.

- *Transferencia de carga*: transferencia de cargas positivas y negativas que se producen en la reacción.



- *Difusión*: debido a los movimientos de los reactantes y productos de las reacciones, lo que supone una polarización de las concentraciones en los electrodos.

Los procesos de modelado químicos son muy precisos, ya que simulan a muy pequeña escala los fenómenos que tienen lugar en el interior de la batería. Por contraposición, tal precisión implica que estén basados en cálculos muy complejos. La mayoría consisten en seis ecuaciones diferenciales no lineales, cuya simulación lleva horas o hasta días, lo cual es inviable para vehículos ya que los sistemas de control normalmente necesitan datos en tiempo real.

### 4.2.3 Modelado desde el punto de vista analítico

Un modelo analítico es aquel que toma el sistema a analizar como un todo, y lo subdivide en pequeñas partes, con el objetivo de conocer todos sus fenómenos y causas. La diferencia con los tipos de modelos anteriores es que no se basa en un único ámbito, como puede ser la química o la eléctrica, si no que normalmente usan técnicas heurísticas o fórmulas empíricas para modelar alguna característica específica de la batería.

Se trata de un tipo de modelos que son fácilmente desarrollables, pero que normalmente no son muy precisos ya que no tienen en cuenta la mayoría de la influencia de las distintas características entre sí.

Los modelados heurísticos más comunes se basan en la ecuación de Peukert, usada para modelar la capacidad de la batería en función de la descarga que tenga lugar. También es usual modelar la eficiencia de la batería analizando el tiempo de vida de ésta en función del perfil de corriente que define la carga o la descarga. En [7], [8] y [9] se analizan más en profundidad estos tipos de modelado.

### 4.2.4 Modelado desde el punto de vista estocástico

Un modelado estocástico implica el análisis estadístico de los valores del sistema, valorando que los cambios que en él se producen dan lugar a resultados aleatorios, más o menos probables.

Este tipo de modelados basan principalmente su lógica en cadenas de Markov en tiempo discreto, en las cuales la probabilidad de que se produzca un suceso depende directamente del suceso anterior. De esta forma son modelos más intuitivos pero mucho menos descriptivos y precisos.

En [10] se puede ver un ejemplo de modelo estocástico en el que la carga total de la batería se divide en unidades de carga, representando cada unidad la cantidad de energía que debe ser transferida al exterior o al interior de la batería.

Se ha de destacar que debido a su falta de precisión y capacidad descriptiva estos modelos no han tenido mucha influencia en el estudio de las baterías de ión-litio en vehículos eléctricos.

## 4.3 Aspectos relevantes en la elección de la tipología de modelado

A la hora de elegir el tipo de modelo que será más eficaz para un sistema concreto han de valorarse una serie de aspectos. Lo primero que hemos de tener en cuenta son los conocimientos y herramientas que se poseen y así analizar si podremos valorar todos los puntos de vista nombrados en el apartado anterior, o por el contrario será conveniente descartar alguno de ellos, como puede ser el caso de descartar un modelado químico si no se tienen conocimientos profundos de química o si los conocimientos sobre eléctrica son más profundos.

Por otro lado se ha de hacer un balance entre la precisión que necesitamos conseguir en la predicción del comportamiento de la batería y la eficiencia computacional de la que se podrá disponer. El motivo de este necesario planteamiento es la relación inversa que estos dos factores poseen, cuando mayor precisión queramos obtener mayor complejidad tendrán los cálculos a realizar, lo que implicará una menor rapidez en los cálculos y por tanto menor eficiencia.

Hay que destacar que en el caso que se estudia en este trabajo fin de grado, la aplicación de las baterías de ión-litio en los vehículos eléctricos, es conveniente un control de los parámetros a tiempo real, lo que significa su medición mientras el sistema está en funcionamiento, y para ello, será fundamental una gran rapidez de cálculo y por tanto una gran eficiencia computacional.

Cada tipo de modelo tiene la capacidad de poder reproducir la influencia de unos efectos determinados, sin ser capaz de reproducir los efectos causados por otros fenómenos, efectos concretados anteriormente en la descripción de cada tipología. De aquí que antes de seleccionar el modelado a usar será imprescindible plantearnos si tendremos en cuenta o no los siguientes efectos:

- Efecto de después de un tiempo de reposo.
- Efecto del perfil de corriente en la capacidad útil.
- Efecto térmico en la capacidad útil.
- Efectos producidos por el nivel de carga que posee la batería.
- Efecto del envejecimiento de la batería y del número de ciclos que ha sufrido.
- Efectos producidos por el fenómeno de autodescarga.
- Efectos producidos por el fenómeno de histéresis entre la carga y la descarga.

Será muy importante analizar también la corriente y potencia de la batería, en cuanto a constancia o variabilidad en el tiempo se refiere.

# Capítulo 5

## Análisis de modelos concretos

### 5.1 Introducción

A lo largo de los últimos años se han realizado cuantiosos análisis y modelados de baterías de ion-litio teniendo en cuenta tanto las características eléctricas como las electroquímicas de las baterías. Hemos de destacar que en el apartado anterior, al estudiar los ámbitos posibles que existen para ser tenidos en cuenta a la hora de realizar el modelado de una batería, han sido vistos los modelados realizados desde el punto de vista analítico y estocástico, pero cuando posteriormente hemos llevado a cabo el análisis de los modelos realizados en el mundo de las baterías hemos podido apreciar que no son técnicas que se hayan seguido de manera relevante. Por tanto en el análisis realizado en este capítulo solo estarán presentes modelos obtenidos teniendo en cuenta los aspectos químicos y eléctricos de las baterías de ión-litio.

En cuanto a los modelos obtenidos basados en el punto de vista eléctrico, los primeros modelos hallados están compuestos por elementos de valores constantes. Como ejemplo tenemos el modelo más básico que permite reproducir su característica más destacada, la capacidad, con estructura basada en un equivalente de Thevenin, compuesto por una fuente de alimentación ideal en serie con una resistencia. La fuente de tensión representará la tensión existente entre los terminales de la batería. La resistencia simulará la oposición interna de la batería al paso de la corriente. Este circuito, al reproducir solo los efectos de la resistencia interna, ofrece una solución muy pobre y poco precisa. Solo permitirá calcular la capacidad de la batería en un momento concreto.

Se han realizado numerosos tipos de modificación del circuito equivalente de Thevenin, con el objetivo de modelar fenómenos como la respuesta de la batería a sobrecargas o el fenómeno de autodescarga que se da cuando la batería se encuentra en circuito abierto.

Para mejorar la respuesta dinámica de los modelos existentes se crean modelos en los cuales los valores de sus componentes no son constantes, si no que dependen de las condiciones en las que se encuentre funcionando la batería ya que dichas condiciones afectan a la respuesta de la batería. Las condiciones que se tienen en cuenta son el SOC y la temperatura a la que se encuentra y si se trata de un proceso de carga o descarga, influyendo también la forma en la que se realiza dicho proceso.

Situándonos en el dominio de la frecuencia hay que destacar los modelos basados en impedancias, los cuales pueden describir el comportamiento dinámico de las baterías a distintas frecuencias ya que los valores de las impedancias proporcionan información acerca del estado en el que éstas se encuentran, información que depende de diferentes factores como el estado de carga, la temperatura, el estado de salud o el perfil de corriente.

El valor de la impedancia se obtiene a partir de la técnica denominada Espectroscopia de impedancia Electroquímica, mediante la cual, se hace un barrido a altas y bajas frecuencias haciendo uso de una señal de excitación cuya frecuencia elige el usuario, obteniendo como resultado el comportamiento de la batería a las distintas frecuencias, como ya se ha indicado en el capítulo precedente. De esta forma, una vez se conoce el espectro de frecuencias, una opción es reproducirlo mediante componentes eléctricos formando un circuito equivalente, habiendo evidentemente multitud de combinaciones.

Por otro lado, situándonos en un punto de vista químico, el modelo más destacable es el Modelo de Sheperd, el cual detalla la respuesta de la batería directamente en función de la tensión y la corriente. Este modelo usado junto con la ecuación de Peukert permite conseguir los valores de tensión y estado de carga partiendo de los datos de las variaciones de consumo de energía. Se puede encontrar más información en [11].

Después de la aparición del modelo de Sheperd se han realizado diversas modificaciones de éste, basadas en la adición de términos que simulen determinados comportamientos específicos como pueden ser los debidos a sobrecarga o generación de gases.

En este capítulo se van a analizar en profundidad algunos modelos que han sido propuestos en los últimos años, concretando en las baterías de ión-litio, y que han tenido más relevancia. De esta forma apreciaremos la evolución que ha sufrido el modelado de baterías en los años más recientes y tras realizar las comparaciones oportunas se sacarán un conjunto de conclusiones.

Para entrar un poco más en contexto, empezaremos analizando un artículo en el cuál se comparan los artículos, que según su autor, son los más usados y eficaces hasta hace aproximadamente un lustro. A partir de ahí analizaremos nuevos artículos relevantes e innovadores. El fin de marcar ese punto temporal como referencia es realizar un estudio lo más innovador posible, para que el resultado final lo refleje, usando las últimas técnicas del mercado. Aun así se tomarán más fuentes de información anteriores al punto de referencia temporal elegido, para obtener unos resultados bien referenciados y de fiabilidad.

## 5.2 Equivalente de Thevenin con parte transitoria

En [12] se estudia el modelado a partir de un circuito basado en el equivalente Thevenin al cual se le añade una conjunto resistencia-condensador, o RC, con el objetivo de poder simular el comportamiento transitorio de la batería. Además de reproducir sus propiedades eléctricas el autor tiene como objetivo reproducir las propiedades térmicas. Se estudia en qué grado afectan a la respuesta de la batería los efectos térmicos, las no linealidades de la tensión y los ciclos sufridos por la batería. En la figura 2 se muestra el circuito que los autores utilizan en su artículo.

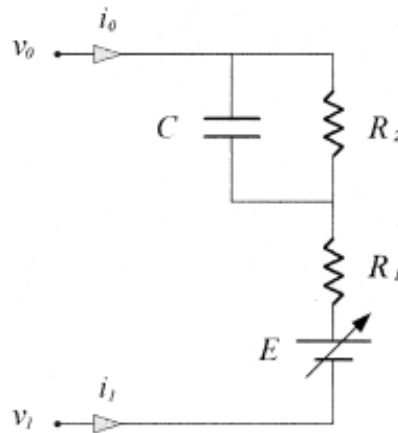


Fig. 2- Modelo Thevenin con RC, propuesto en [12].

La fuente de tensión,  $E$ , representa la tensión de equilibrio normalmente denominada tensión en circuito abierto, que será dependiente del nivel del estado de descarga, o dicho de otra forma, los ciclos de descarga que haya sufrido, y la temperatura a la que se encuentre la batería. La resistencia interna del dispositivo es representado por dos componentes,  $R_1$  y  $R_2$ . Finalmente el condensador  $C$  representa el comportamiento transitorio debido a la transferencia de carga. La tensión entre los terminales del dispositivo viene definida por la diferencia entre  $v_0$  y  $v_1$ .

### **5.2.1 Caracterización de la tensión en circuito abierto $E$**

Es definida mediante un proceso basado en datos experimentales obtenidos con una batería de ión-litio. Para tener en cuenta la temperatura y la corriente de descarga define dos factores,  $\beta[T(t)]$  y  $\alpha[i(t)]$  respectivamente. Finalmente, para reproducir las variaciones de la tensión  $E$  producidas por la temperatura define un parámetro  $\Delta E(T)$ , con valor nulo a la temperatura de referencia. Basándose en todas estas afirmaciones el autor define las ecuaciones para caracterizar la tensión en circuito abierto  $E$ , la tensión entre los terminales de la batería y el estado de descarga. En el propio artículo [12] se puede ver el detalle de las ecuaciones y como se calcula a partir de pruebas experimentales sobre una batería de ión-litio.

### **5.2.2 Caracterización de las pérdidas de tensión**

La causa principal de la pérdida de tensión es la resistencia interna de la batería, representada con  $R_1$  y  $R_2$ , que toma como dependientes de la química de la batería, la temperatura y la velocidad de descarga. El valor de dichos componentes puede ser el proporcionado por los fabricantes o bien calcularse experimentalmente. El autor argumenta que simula la resistencia interna haciendo uso de dos componentes en vez de uno para así poder introducir el condensador que reproduzca el comportamiento transitorio.

### **5.2.3 Caracterización de la repuesta transitoria**

Se define el componente capacitivo  $C$  como encargado de reproducir la respuesta transitoria debida a los procesos de polarización y difusión que se producen en el interior de la batería. La ecuación que define dicho componente y la lógica realizada para su obtención puede verse en el artículo en cuestión.

### **5.2.4 Descripción de las características térmicas**

Se proporciona una ecuación para cuantificar los cambios de temperatura que tienen lugar en la batería, ecuación obtenida a partir de la realización del balance de energía de la batería. Es de destacar la gran información que se necesita tener para realizar este

proceso, información difícil de conseguir en caso de la aplicación a vehículos eléctricos, descartándose como solución para nuestro problema.

Finalmente es necesario realizar una discretización de todas las ecuaciones siguiendo los algoritmos numéricos necesarios, proceso demasiado complejo.

### 5.2.5 Conclusiones

Como resultado del trabajo realizado por los autores Gao y Dougal, se obtiene que su modelo no intuye correctamente el funcionamiento de la batería cuando ésta se encuentra a temperaturas bajas, así como tampoco en el caso de una rápida descarga.

Debido a la complejidad de sus cálculos debería poseer una alta precisión, la cual no posee. Se considera de gran relevancia decir que se trata de un estudio llevado a cabo en el año 2002, por lo que esta falta de precisión es más lógica aún puesto que todavía no se disponían de tantos conocimientos acerca de las baterías de ión- litio. Por esta razón se considera un artículo muy innovador en el momento de su publicación.

## 5.3 Thevenin con redes RC añadidas

El autor del artículo [13] se centra en los modelos basados en Thevenin ampliados al añadirles un cierto número de redes RC. Realiza un estudio en el dominio del tiempo comparando la eficiencia de los modelos en función del número de conjuntos RC que posean, número que identifica como 'n'. Cuantos más conjuntos de redes RC se tengan en cuenta implicará que más efectos se tendrán en cuenta y más preciso será el modelo. Por el contrario, el aumento de redes RC también conllevará el aumento de la complejidad en los cálculos. A continuación se muestra el circuito propuesto por dicho autor.

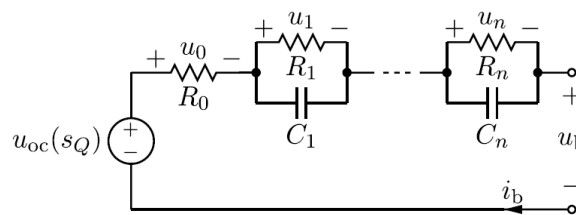


Fig. 3- Modelo Thevenin con varias redes RC, propuesto en [13].

Como se puede observar se tiene en cuenta la influencia del nivel de carga en la tensión en circuito abierto, denotada como  $U_{OC}$  ( $S_Q$ ), además de la resistencia interna representada por  $R_0$ . Los distintos conjuntos RC reproducen el comportamiento dinámico de la batería. Este comportamiento dinámico puede considerarse como la influencia que tienen efectos como la temperatura, el estado de vida o el perfil de corriente. Como ya se ha indicado, se pueden tener en cuenta tantos conjuntos RC como se desee en función de los parámetros de influencia que queramos tener en cuenta en el modelado. Cuantos más parámetros de influencia se tengan en cuenta mejor se reproducirá el comportamiento de la batería. Una única red RC es suficiente para reproducciones simples en vehículos eléctricos, pero sin embargo lo habitual es usar tres redes RC.

Los parámetros se identifican analíticamente aplicando un perfil de corriente y realizando las mediciones correspondientes una vez se ha pasado un pequeño periodo de relajación de la tensión de la batería. La causa de que los parámetros no se identifiquen mientras circula la corriente de carga es que las mediciones pueden tener errores causados por la relación no lineal entre el SOC y el OCV. El número de pulsos y la duración del tiempo de reposo dependen del tiempo que se quiera invertir en realizar las pruebas y la precisión que se quiera obtener.

La identificación de parámetros se lleva a cabo distinguiendo entre dos tipos de conjuntos de parámetros, los parámetros relativos a la corriente de descarga y los parámetros relacionados con la corriente de carga. Una vez se tienen las medidas se realizan los cálculos pertinentes para obtener la información objetivo. A continuación se mostrarán los cálculos llevados a cabo.

- Estado de carga:

$$s_Q = s_{Q_0} - \frac{1}{Q_{us}} \int i_b dt \quad s_Q = \frac{Q}{Q_{us}}$$

- Resistencia interna:

$$R_0 = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|$$

- Tensión entre terminales en caso de  $i$  redes RC después de un periodo de tiempo:

$$u_b = u_{oc} - \sum_{i=1}^n U_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad \tau_i = R_i C_i$$

- Tensión de las redes RC durante el periodo de reposo:

$$u_T(t) = U_{oc} - u_b(t)$$

- Tensión en circuito abierto.
  - Si se asume que el tiempo de reposo es suficientemente largo como para que la tensión entre en equilibrio el valor de la tensión en circuito abierto corresponde al valor de la tensión entre terminales al final de tiempo de reposo.



- En caso de que no exista tiempo de reposo, o de que éste no permita que la tensión entre en estado de equilibrio, la tensión en circuito abierto se calcula usando métodos denominados *Rapid Methods*. Estos métodos son estudiados en profundidad en el artículo [14].
- Parámetros dinámicos de las redes RC:
  - El artículo propone un circuito basado en Thevenin de Segundo orden, cuya tensión de ramas viene dada por la ecuación mostrada a continuación:

$$u_T(t) = U_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

El periodo de reposo ha de dividirse en tantos tramos como redes RC posea el circuito a examinar, en este caso dos. En la gráfica mostrada en la figura 4 pueden verse las distintas divisiones que se realizan, y los instantes de tiempo destacables.

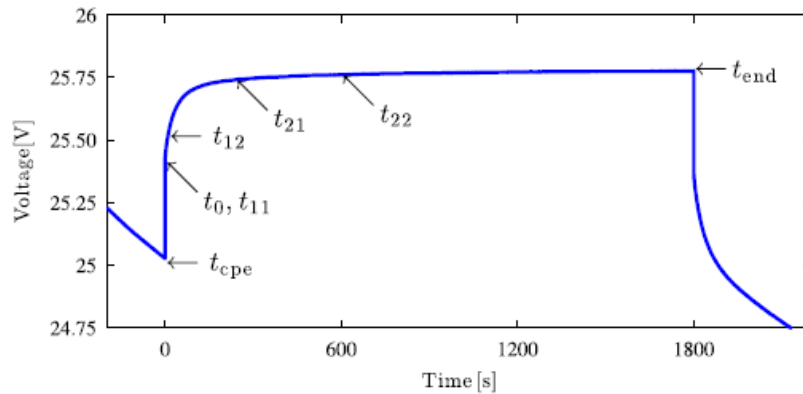


Fig. 4- Representación tensión en circuito abierto en periodo de reposo [13].

Después de un estudio exhaustivo, detallado en más profundidad en el artículo, se definen las ecuaciones que permiten calcular los valores para las capacidades y resistencias dinámicas.

$$R_i = \frac{\hat{U}_i}{I_{cp} \left( 1 - e^{-\frac{t_{ep}}{\tau_i}} \right)} \quad C_i = \frac{\hat{\tau}_i}{R_i}$$

$I_{cp}$  = amplitud de la corriente de carga.

Durante el tiempo de reposo de los valores de las capacidades y resistencias se consideran constantes, lo que en realidad no es así. Asumir la afirmación anterior solo causa un pequeño error en la medición de la tensión, lo cual se puede solventar si se considera un considerable número de procesos de carga.

Es fundamental realizar los cálculos experimentales iniciando siempre por la división que posea una constante de tiempo mayor, acabando por la división que posea una menor.

Tras realizarse distintas pruebas experimentales de carga, PC, y descarga, PD, con unos determinados perfiles de carga, mostrados en la figura 5, se llega a la conclusión de que el método analizado tiene una alta precisión, pudiéndose mejorar al tener en cuenta los efectos de la temperatura.

Experiment
PD 1C / 30 min
PD 2C / 10 min
PD 4C / 30 min
PC 1C / 10 min
PC 2C / 30 min
CCD 1C
LHD

Fig. 5- Pruebas de validación correspondientes a [13].

Como conclusión de este artículo podemos afirmar que se proporciona un método para calcular los parámetros de forma offline de un modelo basado en Thevenin, indistintamente de las redes RC que posea. Es un método rápido de programar y ejecutar. Otra de las ventajas fundamentales de esta técnica es que el proceso de parametrización puede ser automatizado completamente.

El método propuesto puede tener una duración experimental variable, en función de los procesos de carga que se consideren y de la duración elegida para los procesos de reposo.

Sin embargo, la desventaja que posee este tipo de modelos, incluyendo el concreto propuesto, con dos redes es que reproducen la parte transitoria, pero necesitan un tiempo de reposo, por lo que no puede ser usado en aplicaciones online, no permite una estimación en tiempo real, lo cual es totalmente incompatible con la aplicación en vehículos eléctricos. Además no tiene en cuenta el fenómeno de autodescarga y hace distinción entre los parámetros relativos a la corriente de carga y a la corriente de descarga, para así poder tener en cuenta la histéresis, lo que podría ahorrarse al introducir un componente concreto que reproduzca el efecto que tiene este fenómeno que será explicado en el próximo artículo detallado.

## 5.4 Consideración del fenómeno de histéresis

Las baterías no tienen un comportamiento homogéneo en los procesos de carga y descarga, si no que debido a las diferentes condiciones existe una ligera variación causada por la posible diferencia entre el traspaso de iones del ánodo al cátodo y viceversa. Este fenómeno recibe el nombre de histéresis.

En concreto, en una batería se denomina tensión de histéresis a la diferencia entre la tensión en circuito abierto, tras el reposo que la permita estar en equilibrio, propia de la batería a un determinado nivel de carga en el proceso de carga y la tensión para el mismo nivel de carga en el proceso de descarga. Este artículo tiene como objetivo el análisis del comportamiento de la batería teniendo en cuenta la tensión de histéresis.

En [15] se puede ver el modelo propuesto por el autor para la estimación del fenómeno de histéresis, el cual se desarrollará posteriormente haciendo uso de la herramienta Simulink.

El autor considera que los procesos de carga y descarga se realizan completamente, es decir, hasta un estado de carga completo o nulo respectivamente.

A continuación, en la figura 6 se hace referencia a la gráfica que el artículo muestra para la representación gráfica de la tensión en circuito abierto en función del estado de carga que posea la batería, donde se puede apreciar el fenómeno de histéresis.

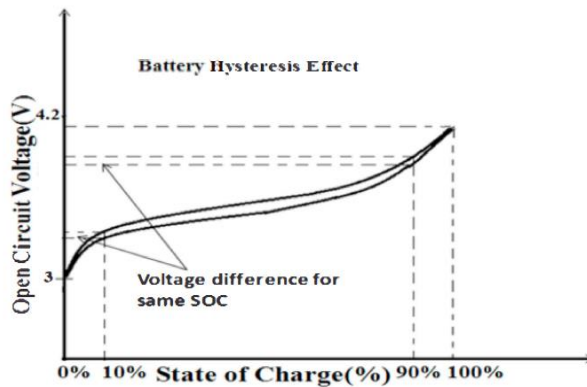


Fig. 6- Relación entre tensión en circuito abierto y estado de carga en [15]

### 5.4.1 Modelo del proceso de histéresis

Los efectos del fenómeno de histéresis se modelan matemáticamente, partiendo de la gráfica mostrada en el apartado anterior. A continuación se muestra gráficamente en la figura 7 el comportamiento de la tensión de histéresis respecto al estado de carga, además de la ecuación por la que viene definida. Se diferencian tres distintos comportamientos.

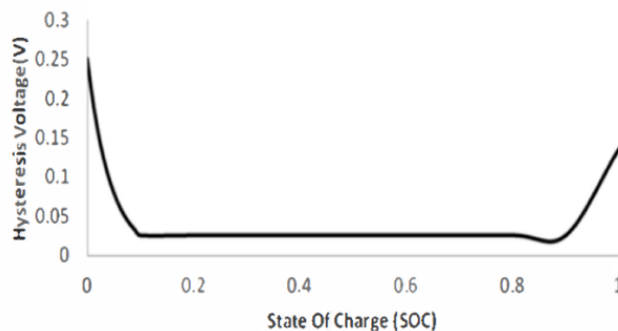


Fig. 7- Relación entre tensión de histéresis y estado de carga en [15].

$$V_{hyst} = \begin{cases} a * \exp(-b * SOC) & \text{if } 0 \leq SOC < 0.1 \\ c & \text{if } 0.1 \leq SOC < 0.9 \\ d * \exp(e * SOC) & \text{if } 0.9 \leq SOC < 1 \end{cases}$$

Los valores de las constantes de las ecuaciones son calculados igualando las ecuaciones a los valores de tensión de histéresis calculados anteriormente y mostrados en la gráfica.

$$V_{bat} = V_{ocvc} + i_{bat}Z_{equ} + \Delta E(T) \quad V_{ocvc} = V_{ocvd} + V_{hyst}$$

### 5.4.2 Validación y conclusiones

Se realiza una validación mediante la herramienta Simulink. Los resultados obtenidos muestran que el subsistema analizado representa muy precisamente los efectos de la histéresis, comparándolo con modelos propuestos por otros autores anteriormente.

Los fenómenos de histéresis varían en función del punto inicial y final en el que se encuentren. En este caso, únicamente se ha considerado el fenómeno de histéresis correspondiente a una carga y descarga completas, ya que la tensión de histéresis de ciclos menores resulta despreciable frente a la histéresis correspondiente al ciclo completo. Sin embargo, los resultados podrían mejorar su precisión si se consideraran los fenómenos de histéresis correspondientes a ciclos de carga y descarga con puntos de inicio y fin de ciclos con distintos estados de carga.

La solución propuesta en este artículo es una solución aceptada y viable siempre que los ciclos de carga y descarga se realicen completamente, como ha considerado aquí el autor desde el principio. El problema encontrado a la hora de poder contar con esta solución es que, en un vehículo eléctrico, los ciclos de carga y descarga no se realizan completamente, tanto por la falta de comodidad para el usuario por temas de tiempo o posición de las estaciones de carga, como por el funcionamiento interno de los vehículos eléctricos, los cuales aprovechan cierta energía, como la de la frenada, para cargar la batería en funcionamiento.

## 5.5 Análisis de modelos en función de su aplicación

En función de la aplicación que tenga una batería, habrá parámetros que deban ser más exactos que otros en ese modelado concreto, o por el contrario, parámetros de los cuales no se necesite una información tan exacta. Teniendo en cuenta esto, en [16] se realiza un análisis de los tipos de modelos de baterías que hay, y de cuál es más adecuado en función de la aplicación que vaya a tener.

La mayoría de los artículos realizados acerca del modelado de baterías que tienen en cuenta el punto de vista eléctrico, se basan en celdas únicas o un pequeño conjunto de ellas. Pero en los vehículos eléctricos las baterías utilizadas están compuestas por hasta centenares de celdas, por lo que el artículo [16] se basa concretamente en estos grandes conjuntos de celdas.

A la hora de modelar una batería existen dos factores que juegan un papel fundamental a la hora de valorar el resultado final, la precisión del modelo obtenido y la complejidad a la hora de realizarlo.

Conviene que el cálculo del comportamiento de la batería sea lo más preciso posible. Dicha precisión depende tanto de lo capaz que sea el circuito equivalente para reproducir el comportamiento de la batería, como de las técnicas que se usen para la identificación de los valores dados a los parámetros y para la obtención de los datos experimentales.

En la mayoría de las ocasiones en las que un sistema sea más preciso, como en este caso, implicará que los cálculos a realizar sean mayores y más complejos, lo que conlleva un aumento del tiempo y de los recursos necesarios. Por tanto, el modelo perfecto será aquel que posea ambas características, la máxima precisión y la menor complejidad, o en su defecto, un recurso capaz de asimilar esa complejidad y convertirla en un factor poco relevante, fácil de solventar.

### 5.5.1 Modelo electroquímico basado en impedancia

El valor de la impedancia se obtiene a partir de la técnica denominada Espectroscopia de impedancia Electroquímica mediante la cual se hace un barrido a altas y bajas frecuencias haciendo uso de una señal de excitación cuya frecuencia elige el usuario, obteniendo como resultado el comportamiento de la batería a las distintas frecuencias, como ya se ha indicado en el capítulo anterior.

Una vez se conoce el espectro de frecuencias, puede optarse por reproducirlo mediante componentes eléctricos formando un circuito equivalente, habiendo evidentemente multitud de combinaciones. Hay que destacar una opción, que como define en [16] y [17], tiene un buen resultado. Se trata del circuito mostrado en la figura 8

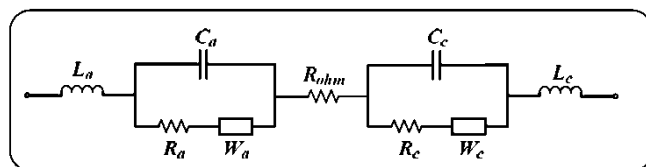


Fig. 8- Modelo electroquímico basado en impedancias [16].

En este circuito cada componente simula un efecto concreto en la batería, lo que genera una fácil aplicación y lectura de los resultados de la EIS. Hace distinción entre componentes que hacen referencia al ánodo, con subíndices 'a', y los que hacen referencia al cátodo, con subíndices 'c'.

Los electrodos, al tener que permitir el paso de los iones a través de ellos son de un material poroso. Este tipo de materiales cuando están expuestos a altas frecuencias tienen un carácter inductivo, comportamiento que se reproduce con las inductancias  $L_a$  y  $L_c$ .

La resistencia interna viene dada por  $R_{ohm}$ . Los componentes  $R_a$  y  $R_c$  representan la resistencia debida a la polarización de activación necesaria de los componentes, también denominada resistencia de la transferencia de carga (RTC).  $C_a$  y  $C_c$  reproducen la capacidad.

Para completar el circuito, se encuentran los componentes complejos  $W_a$  y  $W_c$ , dos impedancias de Warburg, que han sido incluidos basándose en el circuito equivalente propuesto por Randles para dispositivos de almacenamiento de energía [18]. Estas impedancias representan para cátodo y ánodo la resistencia debida al fenómeno de polarización relacionado con el cambio de concentración en los electrodos que se produce cuando hay alguna transferencia de masa, como es el caso de la difusión.

## 5.6 Modelo primer orden en tiempo real

Como venimos diciendo, la precisión depende tanto del método que se use como del método que se aplique para la estimación de los parámetros. En el artículo [19], se realiza una comparación entre tres modelos que siguen técnicas distintas, un equivalente Thevenin, un circuito PNGV y un circuito equivalente no lineal de segundo orden, con dos redes RC.

La comprobación del grado de precisión de cada modelo se lleva a cabo midiendo la tensión de salida que posee la batería frente a la tensión de salida que proporciona el modelo usado, siempre bajo el mismo perfil de corriente de entrada, que en todos los casos es una corriente pulsada.



$U_{OCV}$  representa la tensión en circuito abierto, que es la suma de la tensión dependiente del estado de carga de la batería más la tensión proporcionada por el proceso de histéresis. La tensión entre los terminales de la batería corresponde con  $U_L$ . El modelo tiene en cuenta también el fenómeno de autodescarga, reproducido por la resistencia  $R_d$ . La red compuesta por los componentes  $C_p$  y  $R_p$  reproduce el comportamiento dinámico efecto de la polarización de la batería. Finalmente la resistencia interna se simula con la resistencia  $R_0$ .

La obtención del modelo se basa en un estudio a nivel de estados. A continuación se muestran simplificadaamente los cálculos que desarrolla el autor, para más detalle se puede consultar [19].

- **Ecuaciones de estado:**

$$\begin{cases} \dot{U}_p = -\frac{U_p}{R_p C_p} + \frac{I_L}{C_p} \\ U_L = U_{OCV} - U_p - I_L R_0 \end{cases}$$

- **Obtención de  $U_{OCV}$**

$U_{OCV}$  depende del estado anterior de carga o descarga al mismo SOC: característica de Histéresis.

$$\begin{cases} \dot{U}_h = I(U_{h,max} - \text{sign}(I)U_h) \\ U_h = U_0 e^{-\beta|I|t} + \text{sign}(I)U_{h,max}(1 - e^{-\beta|I|t}) \end{cases}$$

- $I$  corriente circular
- $U_0 - V$  inicial
- $U_{h,max}$ - valor estable
- $\beta$  – constante de  $t$ , medida experimentalmente
- $R_0$ - Resistencia interna

$$U_{ocv} = U_h + U_{soc}$$

- **Identificación básica de parámetros**

Se usa un método experimental basado en una corriente de descarga pulsada. En la figura 10 se muestra la tensión para esta corriente.



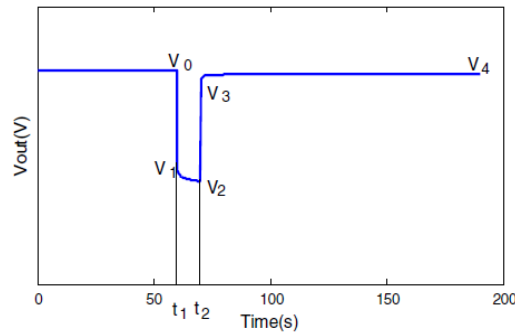


Fig. 10- Voltaje de la batería en caso de descarga pulsada en [19]

$$U_L = U_{ocv} - U_p - i_l R_o$$

- $U_{OC}$ - obtenido con las ecuaciones anteriores
- $U_L$ - medido experimentalmente
- $U_p$ - V de  $C_p$  y es dependiente del tiempo
- $R_o$ - Resistencia interna

*Condiciones del método:*

*Fase estática 1*

Se consigue cuando la batería alcanza su estado interno estacionario.

*Fase de descarga:*

Pulsos de corriente de descarga de 250 A durante 18s. Cuando la I fluye por la RC el V de  $C_p$  aumenta y  $U_L$  viene dada por la ec (1) aunque la fórmula general usada es la (2).

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{C_p} I_L - \frac{1}{R_p C_p} U_p \quad (1)$$

$$U_p(t) = U_p(0)e^{-\frac{t}{R_p C_p}} + R_p I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_p C_p}}) \quad (2)$$

Pero el tiempo de reposo antes de la descarga es suficientemente largo como para que  $U_p(0)$  sea 0, por lo que el circuito pasa a tener una respuesta de una red RC de primer orden, respuesta definida por la ecuación (3).

$$U_p(t) = R_p I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_p C_p}}) \quad (3)$$

Y si calculamos la  $U_p$  para un tiempo de 18 segundos (tiempo en el que la I se corta).

$$U_p(18) = 250R_p(1 - e^{-\frac{18}{R_p C_p}}) = U_p \quad (4)$$

### Fase estática 2

Se consigue cuando la batería alcance su estado interno estacionario.

**Sin entrada de excitación**, o lo que es lo mismo, respuesta ante entrada cero de primer orden RC, por lo que la descarga de la V de la batería en esta fase viene dada por la siguiente ecuación.

$$U_p(t) = U_p(0)e^{-\frac{t}{R_p C_p}} \quad (5)$$

**2 segundos después**, la C se descarga y por tanto la V cambia bruscamente y con el tiempo vuelve a estabilizarse lentamente. Matemáticamente se refleja en la ecuación.

$$U_p(2) = U_p(18)e^{-\frac{2}{R_p C_p}} = U_p' e^{-\frac{2}{R_p C_p}} = U_p'' \quad (6)$$

Por tanto el resultado viene dado por:

$$U_L = U_{OCV} - U_p - I_L R_0 = U_{OCV} - U_p' - I_L R_0 = V_2$$

$$U_L = U_{OCV} - U_p - I_L R_0 = U_{OCV} - U_p'' - I_L R_0 = V_3$$

$$U_{OCV} - V_2 = U_p' + I_L R_0; \quad U_{OCV} - V_3 = U_p'' + I_L R_0$$

For:  $U_k = U_{OCV} - V_2$ ,  $U_g = U_{OCV} - V_3$ , due to  $V_2$ ,  $V_3$  and  $U_{OCV}$  can be measured,  $U_k$  and  $U_g$  can also be measured:

$$U_k = U_p' + I_L R_0; \quad U_g = U_p'' + I_L R_0$$

### • Método de estimación del SOC

Se basa en el método de integración A-h, usando la siguiente fórmula:

$$SOC_{k+1} = SOC_k + \int_k^{k+1} i(t) dt$$

–  $I = i_L(k)$  siendo k el momento online.

– Intervalo  $t = (tk + 1) - tk$

---

Se calcula el valor de  $U_{ocv}$  en el momento  $k$  el que  $U_{soc}$ .

Con la tabla de la  $U_{ocv}$  se calcula el valor del SOC

+ Método fácil:  $i$  y  $t$  puede medirse online

- Difícil obtener el SOC inicial
- Pertenece a un sistema de control de lazo abierto, lo que hace que se desvíe mucho y los datos no sean muy exactos.

*Validación experimental:*

Se realizan un conjunto de pruebas experimentales en las que se intenta comprobar que el valor real del SOC a corriente constante en el inicio es 13,75%. Los resultados de la prueba muestran que este método tiene una mayor convergencia, el valor que se calcule del SOC siempre va a acercarse más al valor real, independientemente del valor inicial. Además tiene una gran precisión en la medición de los valores.

*Conclusiones*

Resumen artículo: El objetivo del artículo es analizar los modelos de baterías, basados en circuitos equivalentes, más conocidos actualmente. Para ello realiza pruebas experimentales que le permitan hallar los principales factores que influyen en el grado de precisión de un modelo. Se diseña y propone un circuito equivalente basado en una red RC de primer orden, y se identifican sus parámetros. Finalmente se comprueba la validez del modelo, concluyéndose que la precisión es alta en comparación con los demás modelos.

Método de estimación de SOC: usado toma como entradas: corriente de carga, tiempo y tensión de carga. A partir de estas entradas obtiene el SOC de forma online, basándose en el modelo equivalente dinámico (red RC de primer orden) y en sus parámetros. Al mismo tiempo, este método permite eliminar el error de la integración  $A-h$  que no es detectable en el valor inicial, y llevar este valor a un estado real rápidamente, bajo las circunstancias que sean.

## 5.7 Estudio térmico con uso de modelo

En [20] se analizan y predicen los efectos de la temperatura en cada componente, con el fin de mejorar diseños y aplicaciones de las baterías si el rango de temperaturas de trabajo permitido se consigue aumentar. La figura muestra cómo puede ser representada eléctricamente una celda.

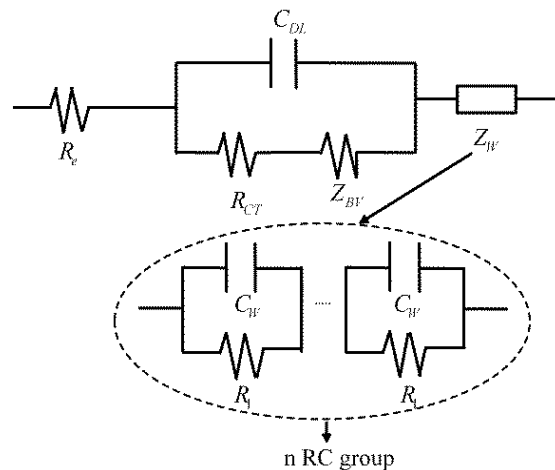


Fig. 11- Representación de una celda para su análisis térmico [20].

- $R_e$  : resistencia ohmica de electrodos y electrolitos.
- $C_{DL}$  : capacidad de doble capa.
- $R_{CT}$  : resistencia de transferencia de carga de los electrodos.
- $Z_{BV}$ : impedancia de Butter-Volmer
- $k$ : constante del grado de transferencia de carga del electrodo embebido en la  $Z_{BV}$ .
- $R_n$  y  $C_W$  : elementos warburg del electrolito.

### 5.7.1 Análisis experimental

Se realizan un conjunto de ciclos de carga y descarga en la herramienta de simulación CALCE en series, diferenciadas por la temperatura a la que opera la batería, siendo los valores 25°C, 35°C, 45°C y 55°C. A cada temperatura se realizan distintas pruebas sometiendo a la batería a distintos perfiles de carga y de descarga. Se tratan de perfiles de carga con relación de corriente y tensión constante, y un perfil de descarga a corriente constante. Más detalle acerca de las pruebas experimentales se puede ser consultado en [20].

### 5.7.2 Conclusiones

Tras el estudio que el autor realiza, se observan distintos efectos, que son diferenciados en función de donde afecten a la batería.

#### *Efectos en la capacidad inicial máxima (electrodos)*

Aumenta con la T: debido a mayor oxidación-reducción en ánodo y cátodo.

- Entre 35 y 45°C:
  - el aumento se incrementa.
  - Es posible obtener mayor corriente.

- Si se estima a 35°C el  $Q_m$  para el conteo de Coulomb, el cálculo del SOC será subestimado lo que pasará siempre que la  $T$  de una celda aumente durante su funcionamiento.
- Después de los 45°C:
  - El aumento disminuye: disminución de actividad en el ánodo cátodo, no es capaz de ofrecer su ion litio almacenado para descarga, es posible que sea porque a altas temperaturas el material se descomponga o transforme

#### ***Efectos en el electrolito***

- Cuando mayor es la temperatura mayor será la concentración de iones que fluyen en el electrolito, lo que implica una disminución de la resistencia aparente del electrolito.
- Incrementa  $Q_m$ : aumenta la carga iónica almacenada en los dos electrodos, que sirven de paredes del  $C_w$ : aumento de  $C_w$  con la  $T$ .

En resumen, a mayor temperatura mayor  $Z$  y de  $C_w$  y por tanto del sistema RC.

#### ***Frontera entre electrodos y electrolito***

Disminución de la  $R_{frontera}$  con el aumento de la  $T$ : debido al cambio de  $k$ , la constante que indica el grado de transferencia de carga en el electrodo, la cuál es directamente proporcional a  $T$ . Como vemos el aumento de temperatura mejora el proceso de transferencia de carga

La sobretensión aumenta con el tiempo y la resistencia serie total disminuye con la  $T$ , lo que conlleva a un incremento de la disipación de potencia.

No es debido al  $Q_m$  asique no se centra en el rango de temperaturas 35-45°C.

$R$  disminuye mucho a más de 90°C.

Las pérdidas de calor se incrementan a más de 45 °C.

El análisis más en detalle de la disminución de la  $R_{frontera}$  a partir de los 55 °C, ayudaría a determinar el conjunto de pérdidas térmicas, obteniendo una buena medida del estado de seguridad de las baterías.

## **5.8 Estudio térmico. Enfoque químico**

Un estudio térmico es realizado en [21], el autor se plantea como objetivos predecir la temperatura de una celda o, en el caso de módulos, de qué forma se produce la distribución de temperatura entre las celdas; obtener parámetros del equivalente térmico y predecir las pérdidas de energía en el interior de la celda. No se lleva a cabo ninguna medición directa sobre el dispositivo.

- **Proceso:**

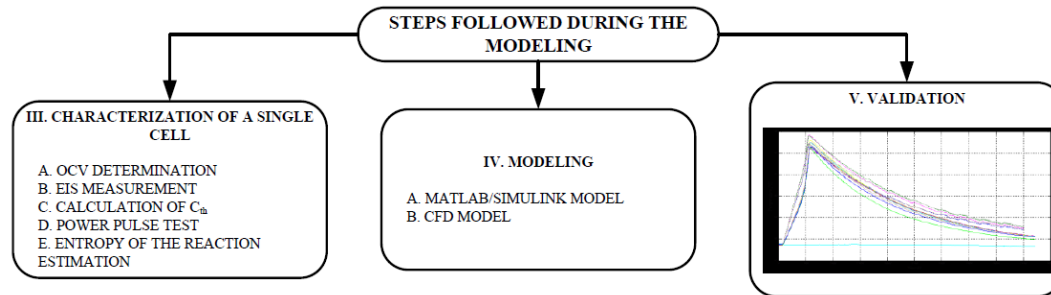


Fig. 12- Representación de una celda para su análisis térmico [20].

*Obtención de parámetros/Caracterización de la batería.*

#### **Determinación de OCV**

Método interpolación lineal: carga y descarga con  $I=0,05C$ .

No se consideran los efectos de sobretensión.

#### **Medición EIS**

Permite medir los parámetros de la impedancia, con el objetivo de encontrar la  $f_0$  a la que la impedancia de la celda es puramente resistiva, sin parte capacitiva, así obtenemos  $f_0$  y  $R_0$ .

Se hace a distintos valores de SOC y a distintas frecuencias ( $f=[6.5 \text{ kHz}, 1 \text{ Hz}]$ )

#### **Test de generación de pulsos de potencia**

Aplicar corriente sinusoidal de  $f_0$  y gran amplitud para generar perfil de pérdida de potencia constante.

#### **Capacidad térmica $C_{th}$**

- *Objetivo:* Cálculo del valor medio de toda la celda.
- *Método:*
  - cuatro termopares en la superficie cubiertos con una capa protectora e insertado todo en un tubo, el cual se llena con un material aislante térmico que solidifica de forma que la celda está aislada térmicamente y los cables están fuera de la estructura, no perdiéndose así el calor que evacua la celda.
  - Se realiza un test de generación de pulsos de P.
  - Obtenemos experimentalmente el incremento del tiempo en función de la temperatura y así calculamos la  $C_{th}$  media con la siguiente fórmula:

$$C_{th} = \frac{q_0 dt}{dT}$$

#### **Coeficiente de calor entrópico**

- *Objetivo:* evaluación de OCV para distintos SOC cuando T varía.
- *Método:* se mete en cámara climatizada, haciendo que T varíe y se mide la OCV y la T de la superficie para las distintas T ambientes ( $T=[18^\circ\text{C}, 32^\circ\text{C}]$ ). Se repite el mismo proceso para 8 distintos SOC.

$$\frac{\partial OCV_{avg}}{\partial T} = \frac{OCV_{avg}(T_{max}) - OCV_{avg}(T_{min})}{T_{max} - T_{min}}$$

Las pérdidas de calor entrópico pueden ser despreciadas, en comparación con las de efecto Joule, si se estudia un perfil de corriente alto, como es el caso.

#### **Simulación**

Se realizan dos simulaciones distintas, diferenciándose en la herramienta mediante la que se lleva a cabo. En primer lugar se realizará una simulación con Matlab/Simulink. Posteriormente se realizará el modelado a partir de una herramienta de simulación 3D, concretamente CFD (Computational Fluid Dynamics).

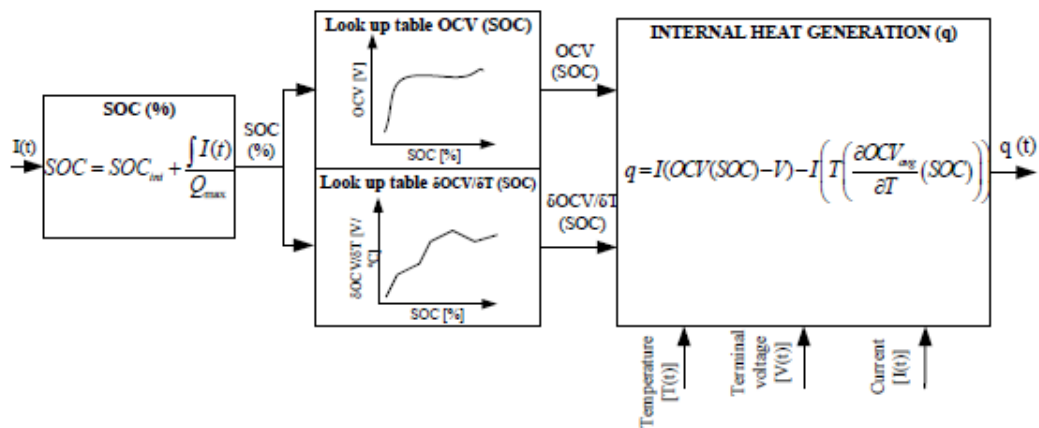
### Matlab/Simulink

Proceso iterativo: cada periodo de  $t$  la  $T$  de la superficie se calcula y vuelve al calculador de generación de calor interna ya que esta variable es dependiente de la  $T$  y entonces la generación de calor interna es aplicada en el modelo térmico para calcular la  $T$  de la superficie de nuevo.

- A. Cálculo del calor generado internamente por la celda.
- B. Estimación de  $T$  superficial a través del modelo térmico equivalente.
- C. Validación del modelo Matlab/Simulink.

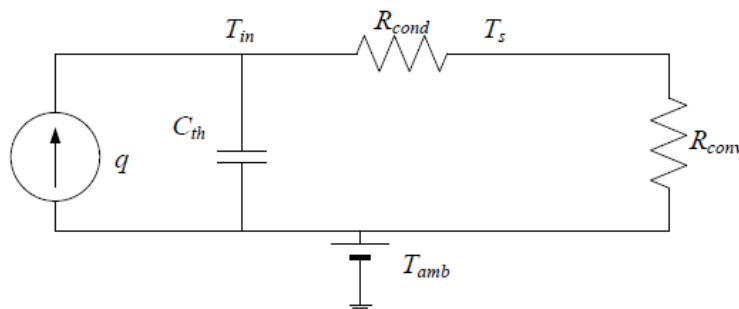
A. Cálculo del calor generado internamente por la celda

Inicialmente se calcula el SOC, a partir de él los parámetros de la tensión, tanto la tensión media como la deriva debida a la temperatura. Posteriormente se calcula el calor de la celda  $q$ , tal y como se indica en el siguiente esquema, tomando los valores de  $V$  e  $I$  mediante mediciones constantes. Sin embargo la temperatura se obtiene mediante el modelo térmico.



- B. Estimación de la  $T$  superficial a través del modelo equivalente térmico

Una vez calculado el calor generado, éste se aplica al modelo térmico que se muestra a continuación. En este modelo se toman  $V$ ,  $I$  y  $q$  como entradas, y se halla la temperatura.



- $T_{in}$  : temperatura en el interior de la celda.
- $T_s$  : temperatura en la superficie de la celda.
- $T_{amb}$  : temperatura ambiente.
- $C_{th}$  : capacidad térmica, calculada anteriormente. Determina la dinámica de la T entre interior y superficie.
- $R_{cond}$  : resistencia por conducción, determina la diferencia de temperatura entre el interior de la celda y su superficie.
- $R_{conv}$  : resistencia por convección, determina la diferencia de temperatura entre la superficie de la celda y el ambiente.
- $R_{cond}$  y  $R_{conv}$  son hallados a partir de los resultados del test de generación de potencia.
- $T_{amb}$  constante.

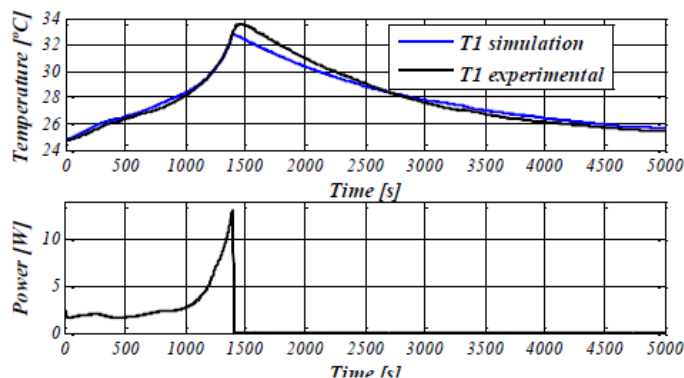
THERMAL EQUIVALENT CIRCUIT PAREMETERS

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
$C_{th}$	272 [J/°C]
$R_{cond}$	1.8 [°C/W]
$R_{conv}$	3.371 [°C/W]

$$T_s(t) = T_{amb} + R_{conv}q \left( 1 - e^{\left( \frac{-t}{C_{th}(R_{cond} + R_{conv})} \right)} \right)$$

### C. Validación del modelo Matlab/Simulink

No realizan validación ya que no contaban con un calorímetro.



### Tsuperficial esperada y medida

Generación interna de calor esperada (calculada a partir del modelo). No ha sido validada ya no disponían de un calorímetro.

### Ilustración 1 - Proceso completo de descarga a 3C

Sin embargo,

viendo la

Precisión de los resultados obtenidos para la Tsuperficial, es suficiente para pensar que no habrá demasiado error (EL PROBLEMA DE ESTA VALIDACIÓN ES QUE HAY QUE CREERSELA, NO LO DEMUESTRA)

*Modelado en 3D con software CFD (Computational Fluid Dynamics)*



La escasa información que se posee acerca del interior de las celdas y de sus dimensiones dificulta la construcción de modelos 3D por capas para las celdas de ion-litio.

Los modelos 3D a capas proporcionan una precisión muy alta, pero como contrapartida, su realización conlleva mucho tiempo. Por esta razón se desarrolla un modelo 3D muy sencillo para poder evaluar la temperatura superficial para una celda o módulos de celdas.

#### A. Modelo 3D de una única celda

Se asume:

- La celda se considera un único cuerpo con propiedades térmicas específicas: calor específico, conductividad térmica y densidad constante.
- Generación de calor uniforme en todo el cuerpo.

El calor específico y la conductividad térmica isotópica tienen los mismos valores que los obtenidos en el modelo creado mediante Matlab/Simulink.

La densidad la obtenemos de las especificaciones de la celda.

EL radio de generación de calor interno es obtenido del modelo anterior también y aplicado como entrada en el modelo CFD.

#### RESULTADO:

En todas las simulaciones el calor se transfiere por la superficie al ambiente por convección natural.

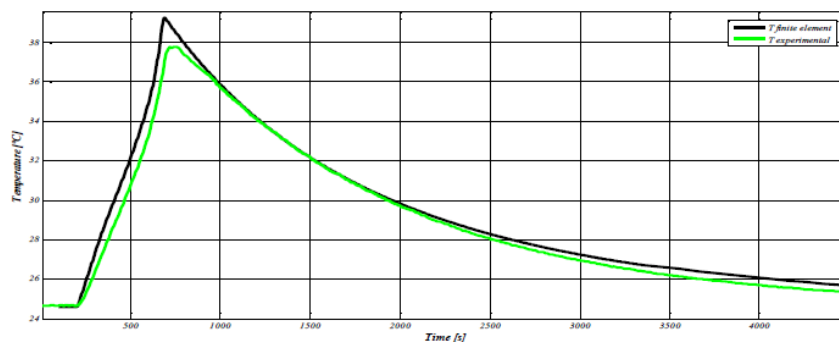


Fig. 12. 7.69C complete discharge results for the CFD model.

La grafica compara la temperatura media de la superficie a lo largo del proceso de descarga (obtenida mediante la simulación) y la temperatura medida experimentalmente.

Como conclusión podemos ver que existe un error de precisión, pero si tenemos en cuenta la simplicidad del modelo usado para la simulación podemos decir que es un buen resultado.

#### *Conclusiones*

En relación a la **generación interna de calor**, se comprueba que la ecuación de Bernardi y los hechos asumidos son válidos para obtener un adecuado valor del parámetro.

Las ecuaciones de Bernardi se han validado indirectamente, comparando las temperaturas en la superficie obtenidas con los modelados (Matlab/Simulink y 3D) con las obtenidas experimentalmente. Sin embargo, es recomendable que se disponga de un

equipo especial para medir la cantidad de calor generada, para así realizar la validación de forma más directa de la ecuación de Bernardi.

En lo que se refiere a **Matlab/Simulink**, se puede decir, que un circuito equivalente térmico RC de primer orden es capaz de reproducir el comportamiento de la temperatura superficial media en la celda probada. La metodología usada para hallar los parámetros del circuito equivalente es adecuada si observamos los resultados obtenidos durante el ajuste de los parámetros. Por el contrario partida podemos apreciar que se comete un error de precisión en las simulaciones. Como mejora aumentar la precisión en las simulaciones y aumentar el orden del circuito equivalente térmico mejoraría los resultados.

El **modelo 3D** tiene como principal ventaja que permite calcular la distribución de la temperatura, tal y como lo muestra este artículo.

## 5.9 Análisis mediante red neuronal

Se realiza un análisis del rendimiento y precisión de las redes neuronales artificiales (ANN) para la estimación del grado de degradación/envejecimiento de una batería en vehículos eléctricos, con el objetivo de: estimar fiablemente el SOC usando el método de conteo de Coulomb y posteriormente calcular la vida de la batería. Además en [22] se pretende predecir con precisión la vida útil que le queda a la batería.

### 5.9.1 Características de las redes neuronales

Las redes neuronales se caracterizan por ser muy precisas si son bien entrenadas debido a su masiva estructura paralela. Además pueden implementarse en tiempo real. Y siempre son estables.

Como ventaja no están basadas en ningún tipo de modelo térmico químico o físico, pero requieren muchos datos para entrenarlas antes de ser eficientes. Pero como ventaja: es fácil obtener muchos datos mediante: pruebas de carga o descarga de corriente constante, pruebas de carga o descarga de corriente pulsada, varios ciclos de conducción y la medida de la capacidad de la batería

### 5.9.2 Modelo NIO

El modelo NIO, non linear input-output, está basado en un bucle abierto, en el cual la relación entrada/salida no es lineal. En la figura se muestra una representación común de un modelo NIO.

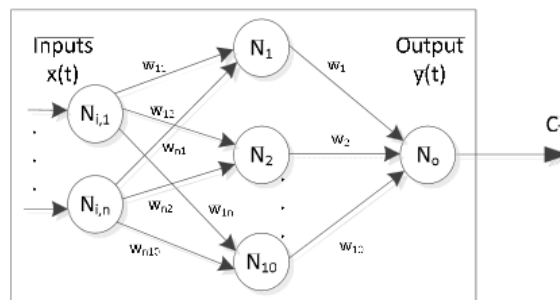


Fig. 13- Modelo neuronal NIO en [22].

### 5.9.3 Modelo NARX

Se denomina modelo NARX por ser un modelo de red neuronal autoregresivo no lineal y con entrada externa. En la figura se muestra una imagen de un modelo neuronal NARX

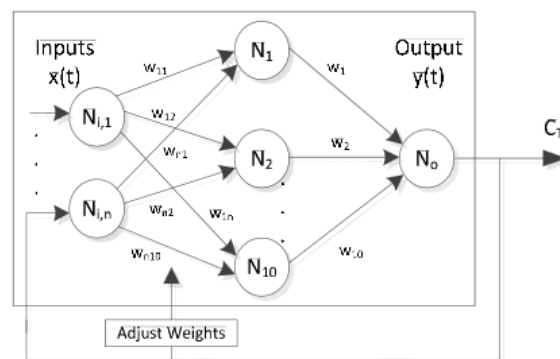


Fig. 14- Modelo neuronal NARX en [22].

### 5.9.4 Pruebas experimentales

Se realizan dos procesos de carga y carga y descarga de 480 ciclos en dos celdas de ion-litio a temperatura ambiente, en una cámara con carga total y permanecen ahí durante seis horas.

Se les hace una prueba de esfuerzo dinámico, una descarga residual hasta tensión mínima. Se vuelven a cargar y descargar totalmente con otro perfil de corriente y se miden las capacidades.

Para validar los resultados se realizan dos pruebas, se crea un modelo neuronal NIO para cada celda y se prueba en ella misma. Como segunda prueba se crea un modelo neuronal NARX para la celda uno y se prueba en la dos.

### 5.9.5 Funcionamiento

No son exactas al 100% ya que el perfil de corriente es difícil de prever exactamente en la práctica, además del error que cometan los sensores al medir la corriente o los demás parámetros en el control.

Para una estimación correcta del SOC es imprescindible la mayor exactitud al medir los parámetros ya que puede variar mucho.

En una batería que consta de cientos de celdas, los parámetros internos y capacidades pueden variar de una celda a otra. En este caso, la capacidad de cada célula individual deben ser monitoreadas, y la capacidad total de la batería estará limitada por la celda con la capacidad más baja.

Para estimar la capacidad se hace uso del software basado en redes neuronales, el cuál se almacena como código en una memoria no volátil y es ejecutado por el microprocesador en tiempo real.

El tamaño de la memoria, así como la capacidad computacional del microprocesador son dictadas por el tipo de la red neuronal utilizado, el nivel deseado de exactitud, y el número de entradas y neuronas. En general, para que la exactitud específica aumente, se ha de aumentar la precisión de los sensores y el hardware de la memoria, lo que conlleva un coste de implementación más alto.

### 5.9.6 Conclusiones

El artículo analiza la aplicación de las redes neuronales en la estimación del SOC y SOH de baterías de ión-litio. Se comprueba que se pueden obtener resultados muy precisos, siempre y cuando se entrene correctamente la red neuronal, pero no solo ante circunstancias estables, si no también ante variaciones de los parámetros internos de la celda. Además, el uso de un método preciso en la estimación de la capacidad conlleva claramente a unos resultados más exactos del SOC y permite obtener la vida que le queda a la batería (en vehículos eléctricos un desvanecimiento de la batería del 20% indica que la batería ha llegado al fin de su vida).

Antes de poder implementar el modelo en la práctica la red neuronal tiene que ser entrenada, validada y probada fuera de línea. El objetivo de las pruebas es calcular los pesos de las funciones de ponderación que hacen que la red sea precisa, con el rendimiento que deseemos. Finalmente, después de todo este proceso, el modelo se traduce en un código incrustado y ejecutado por el BMS en tiempo real.

## 5.10 Conclusiones

---

En la aplicación a vehículos eléctricos, está más extendido el uso de modelos eléctricos basados en Thevenin o en impedancias. Los motivos son su rápida ejecución y su intuitivo análisis, además de su precisión a la hora de estimar el SOC, la tensión en circuito abierto y la tensión entre terminales bajo un perfil de corriente de carga dinámico. Sin embargo, los modelos basados en el tiempo no son suficientes para reproducir el comportamiento exacto de la batería, ya que se trata de un componente dinámico y, por tanto, está caracterizada por parámetros no lineales variantes en el tiempo.

La mayoría de los métodos de identificación de parámetros para modelos basados en Thevenin son métodos realizados de manera online o métodos de optimización numérica iterativa mediante pruebas experimentales o distintos métodos.

En este capítulo vamos a definir el modelo que proponemos para caracterizar a una batería de litio y del cual identificaremos la magnitud de los parámetros del circuito.

En primer lugar la resistencia interna de la batería, propia de las leyes fundamentales de la química y la electricidad, debe ser tomada en cuenta inevitablemente. Se representará como una resistencia denominada resistencia ohmica. Se calculará experimentalmente siguiendo la Ley de Ohm, teniendo en cuenta la tensión de la batería y la corriente instantánea que circula por ella.

Para representar cómo influye el estado de carga en el que se encuentra la batería en la tensión en circuito abierto, se usará para en el modelo una fuente de tensión variable, dependiente del nivel de carga.

El estado de carga propio de la batería se obtendrá por el método de Coulomb, o también denominado método de integración amperios-hora.

Como hemos visto, el paso del tiempo también tiene consecuencias ante las características y funcionamiento de una batería. Con el uso, la capacidad útil disminuye. Incluso cuando no está en funcionamiento la capacidad disminuye levemente, lo que se denomina autodescarga o, si hablamos de corrientes, corriente de autodescarga. Este comportamiento se simulará añadiendo una resistencia en paralelo a la fuente de tensión variable, denominada Resistencia de autodescarga.

La corriente de autodescarga en las baterías de ión-litio es muy pequeña, por lo que será despreciada

La batería posee una estructura y materiales que la caracterizan tal y como se ha desarrollado. En adición, durante el funcionamiento de la batería, tienen lugar los procesos de histéresis y difusión. Estos aspectos fundamentalmente conllevan un comportamiento transitorio de la batería, y que será reproducido por una serie de redes RC. Tras estudiar exhaustivamente los artículos expuestos con anterioridad entre muchos otros se ha decidido que el modelo estará compuesto concretamente por dos redes RC ya que los cálculos necesarios se complican en proporción a la complejidad del circuito.

El cálculo de los parámetros RC se realizará aplicando un filtro de Kalman, que permite calcular con mucha precisión los parámetros en sistemas no lineales.

Debido a la configuración del circuito, inevitablemente se producirá una pequeña caída de tensión constante relativa a pequeñas corrientes. Estas pérdidas vendrán reproducidas con un diodo Zener situado en paralelo a la red RC que posea mayor constante de tiempo.

Cuando la batería se encuentra en un estado de carga concreto, la tensión en circuito abierto tendrá un valor u otro en caso de que la batería se encuentre sometida a un proceso de carga o descarga. Dicho de otra forma, un estado de carga determinado puede tener asignadas distintas tensiones en circuito abierto. Este fenómeno recibe el nombre de histéresis y puede ser representado mediante una tensión de histéresis, por medio de una resistencia en serie a un diodo, que a su vez tendrán en paralelo otro diodo. Los diodos forzarán que la corriente en el proceso de carga pase por una rama y en la descarga circule por la rama complementaria, creándose así la diferencia de potencial como consecuencia de la tensión de la resistencia situada en una de las ramas.

La tensión de histéresis se calcula experimentalmente, tal y como se hace en el artículo [15].

# Capítulo 6

## Solución propuesta

### 6.1 Introducción

En los subcapítulos que comprenden la solución propuesta, se va a desarrollar el marco de trabajo en el que nos vamos a encontrar, explicando las circunstancias y necesidades de trabajo. Posteriormente vendrá concretado el diseño del modelo propuesto, explicando en detalle la arquitectura del circuito y hallando los parámetros del circuito para una batería de características concretas, lo que consideraremos modelo unitario.

Posteriormente, a partir de este modelo unitario se realizará una extrapolación de los resultados a fin de hallar un modelo estándar a fin de poder estimar la energía que dispone una batería de ión-litio, siempre que se conozcan sus características específicas. Usaremos esta extrapolación a la batería específica de la moto eléctrica en cuestión, pudiendo caracterizar los parámetros del modelo que nos permitirá estimar su comportamiento y la energía que podrá suministrar al vehículo.

Finalmente se realizarán las simulaciones para el modelo unitario y el modelo correspondiente a la batería de nuestra moto eléctrica. El modelo unitario será excitado con un perfil de corriente pulsada, elección que se argumentará más adelante y se comprobará que responde de acuerdo a las funciones típicas de una batería de ión-litio, explicadas ya en los capítulos anteriores. Las simulaciones del modelo de la batería de la moto se llevarán a cabo teniendo en cuenta los datos específicos de la batería y tres perfiles de carga típicos de una moto eléctrica.

## 6.2 Marco de trabajo

El estudio previo realizado nos ha permitido conocer el comportamiento y cualidades de una batería de ión-litio, y cómo poder modelarla de la forma más precisa para estimar la energía que dispone y que será capaz de proporcionar. Quizá así dicho pueda no parecer tan relevante, pero es fundamental para la aplicación de la batería a cualquier sistema eléctrico.

En nuestro caso concretamente, el sistema de trabajo va a ser un vehículo eléctrico con una batería de ión-litio con unas características concretas y predefinidas que se especificarán más adelante. Nuestro objetivo principales conocer la viabilidad del uso de la batería a bordo del vehículo eléctrico cómo sistema distribuido de almacenamiento de energía en una Red Eléctrica y así conocer la autonomía del sistema. Cuando hablamos de un sistema autónomo implica que no necesita de ningún factor externo para desarrollarse por sí mismo, lo que aplicado a un vehículo eléctrico, desde el punto de vista energético, que el sistema sea autónomo implica que sea autosuficiente por sí mismo y no necesite ningún aporte de energía externo. Para hacer la afirmación anterior tomamos como sistema el conjunto moto y batería.

Por tanto, para comprobar la autonomía del sistema es necesario realizar un balance de energía en el interior del sistema, cuantificando por un lado la energía disponible que tendrá el sistema para consumir y en contraposición la energía que necesitará tener disponible el sistema para realizar los esfuerzos que se le requieran.

Al calcular el balance de energía, si la energía que se encuentra disponible es mayor que la energía que requiere el sistema implicará que la solución es viable. Si por contraposición la energía disponible para el consumo es menor que la que necesita el sistema significará que llegará un punto en el que el sistema no disponga de energía y no pueda realizar su función, lo cual implicará el incumplimiento de la condición de autonomía y por tanto, acorde a nuestro objetivo, la no viabilidad de la solución. A continuación, en la figura 15, se muestra un esquema del flujo de análisis para facilitar la comprensión del tema, con los distintos niveles que lo componen,



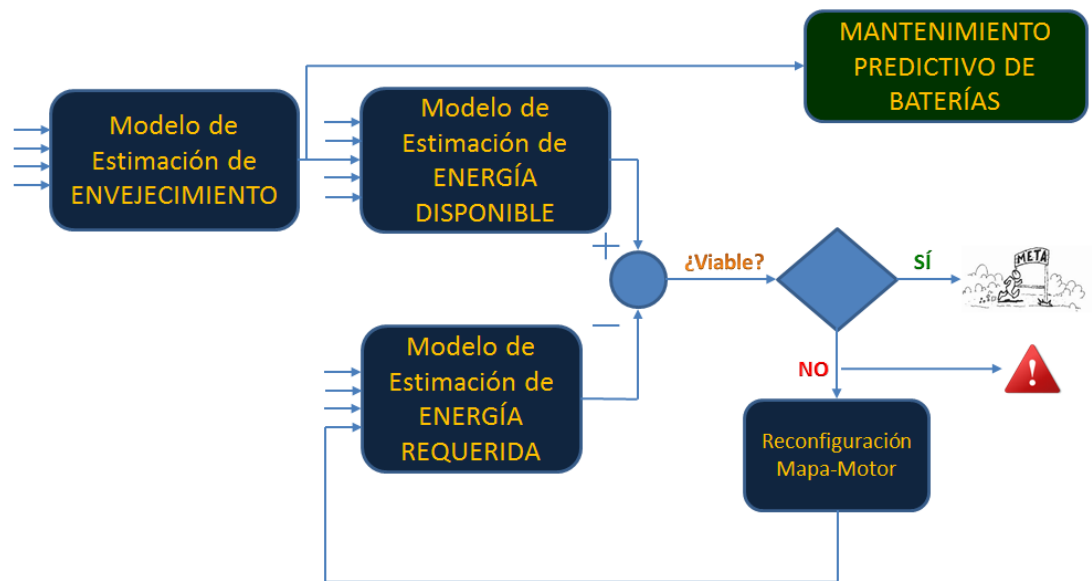


Fig. 15- Flujo de trabajo.

En caso de que como resultado del balance se obtuviese un sistema no viable se tendría que llevar a cabo una reconfiguración del mapa-motor. Esta medida consiste sencillamente en analizar de nuevo las características del sistema y ver las posibles modificaciones que se puedan realizar, que han de ser o bien disminuir la energía requerida por el sistema o aumentar la energía de la que pueda disponer. Tal y como se ha indicado anteriormente las características de la batería y el sistema son las que se proporcionan, no es una variable que podamos modificar, por lo que solo nos queda como opción el disminuir la energía que necesite consumir el sistema, y esto significa disminuir la potencia del vehículo eléctrico.

La estimación de la energía requerida se está resolviendo actualmente por un equipo de investigación del presente centro de estudios, la Universidad Carlos III de Madrid. Se está creando un modelo mediante la aplicación de inteligencia artificial. Se está haciendo una estimación de consumos futuros a partir de los consumos pasados. Se hace la estimación por segmentos, realizando rutas con unas características específicas como pueden ser perfil de velocidad, pendiente o distancia, tomándose las mediciones de los perfiles de potencia y energía requeridas. En función de estas medidas se saca un perfil de gasto de energía que servirá para predecir el consumo en función de los requerimientos de uso, es decir, la energía requerida.

En cuanto a la estimación de la energía disponible por el sistema, será una parte donde se focalizará la solución propuesta en este artículo y así haciendo uso de la energía requerida por el sistema que se conoce, analizar la autonomía del vehículo, objetivo global como hemos indicado anteriormente. Es necesario el conocimiento de muchos factores de influencia para el cálculo de la energía que pone a disposición la batería, pero hemos de destacar uno de ellos, el estado de salud, SOH, ya que como se ha indicado en capítulos anteriores, es difícil de conocer, se ha de realizar una estimación aparte.

Además, el conocimiento del nivel de salud de la batería permitirá llevar a cabo un mantenimiento predictivo y así poder estimar cuando se necesitará renovar el sistema de almacenamiento, sin necesidad de llegar al punto de que el estado de la batería haga inutilizable al sistema.

Tanto para la estimación de la energía que ofrece la batería, como para la estimación del envejecimiento se va a utilizar el mismo modelo basado en un circuito eléctrico, a partir del cual simulamos el comportamiento de la batería y por tanto estimaremos como va a reaccionar en un futuro. La arquitectura de la solución será detallada minuciosamente en el próximo subcapítulo, argumentando también las razones de la elección del modelo con sus ventajas e inconvenientes.

A la hora de realizar las pruebas experimentales en el modelo, se van a considerar desacoplados los ciclos principales de carga y descarga, invirtiendo cada uno de ellos para las pruebas de estimación de envejecimiento y de energía disponible respectivamente. En ambos procesos se va a contar con la información de las señales de tensión, corriente y temperatura, todas ellas en función del tiempo.

En los procesos de carga consideramos que hay tiempo suficiente como para realizar cada ciclo de forma óptima, además de ser ciclos con perfil constante de carga. Estas condiciones favorecen un marco ideal para la obtención del grado de envejecimiento de la batería.

En referencia al proceso de descarga, en el cual nos interesa conocer la energía disponible, se ha de destacar que en el sistema se está tomando como única fuente de energía la que se le proporciona a la batería al cargarse. Es habitual encontrarse en un vehículo eléctrico el aprovechamiento de la energía que se genera en la frenada, denominada energía regenerativa, debida a la transformación de la energía dinámica, de forma que esta energía no se pierda y se utilice para cargar la batería. En esta solución vamos a suponer que el vehículo posee un buffer compuesto por supercondensadores donde se almacenará la energía regenerativa de forma que no retorne a la batería para cargarla. De esta forma supondremos que la descarga será continua, sin intercalarse ciclos de carga y descarga, a excepción de los ciclos de carga que se produzcan voluntariamente por el usuario.

Para la estimación de la energía de una batería, por definición, basta con obtener el producto de los valores de tensión, corriente y tiempo. En la solución que se propone vamos a suponer además como parámetros de influencia de la energía, el tiempo de vida natural de la batería, el estado de salud, la temperatura y el estado de carga en el que se encuentre. La energía de la batería estará relacionada con la carga que ésta posea y que tendrá almacenada, disponible para transmitir al sistema que la requiera y cuantificada por el parámetro SOC, estado de carga.

Sería muy lógico decir que la energía que la batería puede poner a disposición de los elementos a los que alimenta tiene relación totalmente directa con la carga que almacena, o lo que es lo mismo, la cantidad de electrones que alberga en su interior. El hecho de que los electrones determinen la carga es totalmente cierto, un electrón tiene implícita una carga, por definición y de esta forma el número de electrones que contenga la batería definirá la carga que esta almacena. Pero en cuanto a la energía no necesariamente tiene porqué estar relacionada directamente con el número de electrones que posea. Entrando más en profundidad, un electrón no tiene implícita una cantidad de energía, o lo que es lo mismo, no todos los electrones tienen por qué poseer la misma energía. La energía de un electrón depende de la fuerza con la que éste sea atraído

Por tanto el estado de carga es una medida indirecta de la energía, la relación entre ambos parámetros es directa solo si se asume que todos los electrones tienen la misma energía. En nuestro caso, al tratar la autonomía, el parámetro de interés es la energía, así como puede ser el equivalente de Thevenin para un diseñador de BMS's o el estado de carga para un estudio de la electrónica de potencia.

## 6.3 Arquitectura de la solución

En las próximas hojas se va a mostrar la arquitectura de la solución propuesta, caracterizando sus parámetros, lo que nos servirá para saber cómo se comportará la batería. Vamos a utilizar el modelo propuesto por los autores Chen y Rincón-Mora en el artículo [23]. A continuación se muestra en la figura el modelo propuesto por los autores nombrados.

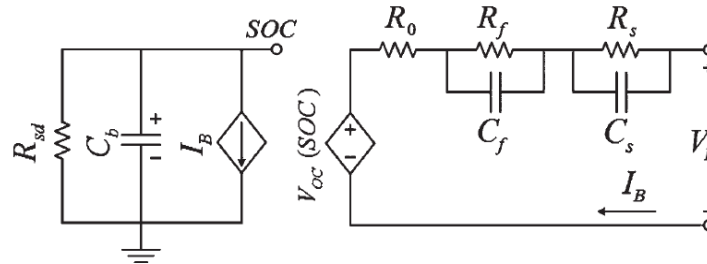


Fig. 16- Modelo seleccionado como solución, propuesto en [23]

Vamos a definir cada parámetro y los efectos reales que representan.  $C_b$  simula la capacidad que posee la batería, cuyo valor viene influenciado por la temperatura y por el envejecimiento que esta haya sufrido. La resistencia  $R_{sd}$  reproduce el fenómeno de autodescarga de la batería, que en el caso de las baterías de ión-litio es muy pequeño, lo que implicará un valor del elemento muy grande.  $I_b$  representa la corriente de carga/descarga de la batería. En cuanto a la tensión en circuito abierto será dependiente del estado de carga de la batería. La resistencia interna está definida por  $R_0$ . Por último, completando el modelo tenemos los elementos  $R_s$  y  $C_s$  y  $R_f$  y  $C_f$  que simulan el comportamiento transitorio a bajas y a altas frecuencias, respectivamente.

El modelo propuesto por Chen y Rincón-Mora puede ser representado de igual forma con la arquitectura que se visualiza en la figura 17.

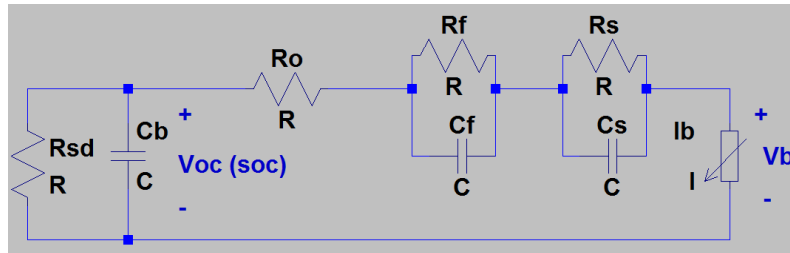


Fig. 17- Modelo de la solución reestructurado

Una vez tenemos la arquitectura con los elementos que la componen hemos de caracterizarlos identificando el valor que tendrá cada parámetro, para ello supondremos que tendremos una batería PL-383562, con una capacidad de 850 mAh, tal y como la usada en artículo de Chen y Rincón-Mora. Las especificaciones de dicha batería son mostradas en un anexo.

La técnica que usaremos será hallar los parámetros del circuito para una batería con unas características concretas, que será cargada y descargada con unos perfiles conocidos también. Nos centraremos en la obtención de la energía. Una vez tenemos caracterizados todos los elementos para dicho caso, en función de los parámetros de dependencia, extrapolamos los resultados hallados de forma que se apliquen a las características de la batería de nuestra moto, y al perfil de corriente que sufrirá.

Tal y como indica en dicho estudio, para caracterizar el modelo se han de definir las relaciones dadas en las gráficas que proporcionan los autores, mostradas en la figura 18.

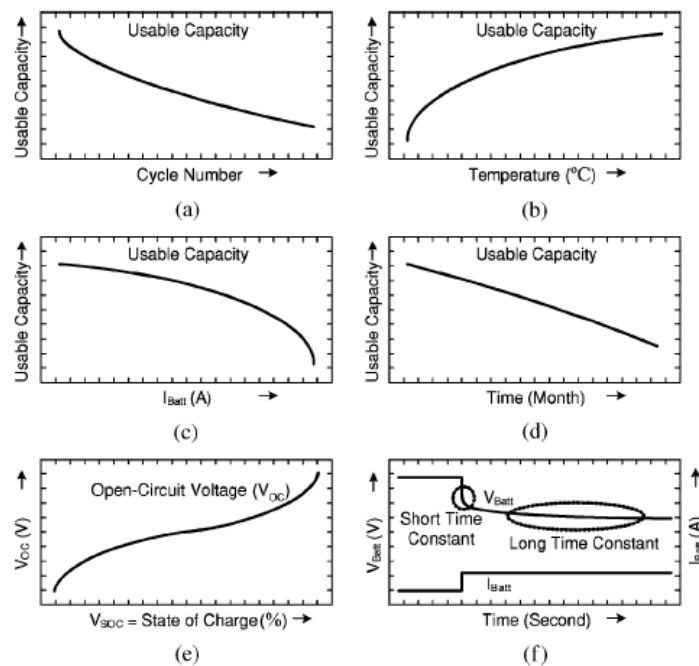


Fig. 18- Gráficas que definen el modelo propuesto

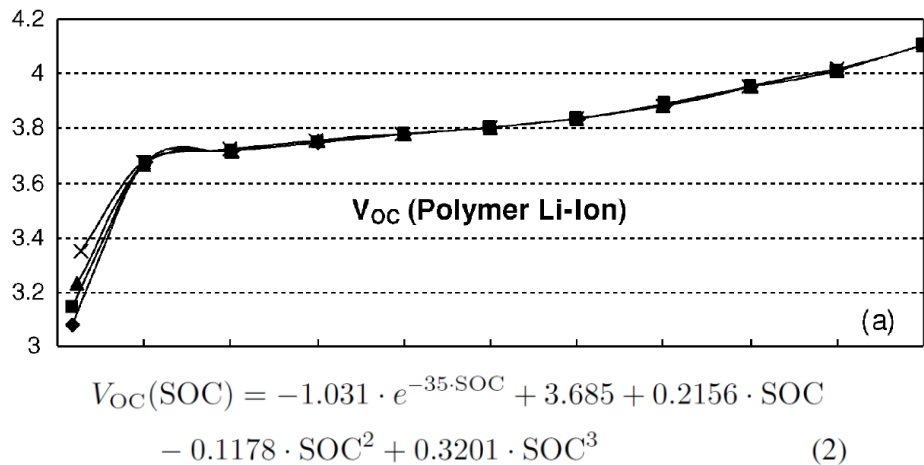
Analizando estas gráficas se puede apreciar que los valores son dependientes del estado de carga, la temperatura, la corriente y el número de ciclos. Todas estas dependencias provocan una complicada extracción del modelo y un tedioso proceso experimental. Por este motivo, y por su baja influencia, casi despreciable se va a simplificar no teniendo en cuenta los efectos que la autodescarga y el número de ciclos genera en el nivel de carga disponible.

Para calcular la capacidad haremos uso de la ecuación mostrada en la figura, la cual depende fundamentalmente de la capacidad nominal de la batería, denominada con el parámetro Capacity, dependiendo además de la temperatura y el número de ciclos, dependencia mostrada con los factores de corrección  $f_1$  y  $f_2$ . Por tanto, para despreciar el número de ciclos fijamos a uno el parámetro  $f_1$ . En cuanto al fenómeno de autodescarga supondremos que es mínimo, otorgándole a la resistencia  $R_{sd}$  un valor que no tenga influencia en el funcionamiento del circuito como es un megaohmio.

Además también despreciaremos la influencia de la temperatura, por lo que el factor de corrección  $f_2$  será definido a uno.

$$C_b = C_{nominal} \cdot f_1(\text{Ciclos}) \cdot f_2(T^a)$$

Lo primero que vamos a hacer va a ser caracterizar el condensador, el cual estará sometido a la tensión en circuito abierto  $V_{OC}$ , valor dependiente del estado de carga, relación casi homóloga para todas las baterías del mismo tipo, y que podemos encontrar en [1]. A continuación, en la figura se muestra tal relación, tanto gráfica como numéricamente.



Podemos hacer una primera aproximación y asumir que la tensión en circuito abierto tiene un comportamiento lineal respecto al estado de carga, siempre que éste se sitúe entre el 10 y el 90%.

Vamos a tomar como referencia estos dos niveles de SOC, 10% y 90%, entre los cuales serán válidos las aproximaciones que realicemos, no siendo así en el caso de que la batería se encuentre en niveles de carga fuera de dicho rango. Partiendo de estas premisas situaremos la tensión de circuito abierto entre 3,67457v y 4,01698v, tensiones correspondientes a los estados de carga 10% y 90%, respectivamente, cuyos valores son calculados a partir de la ecuación mostrada en la figura.

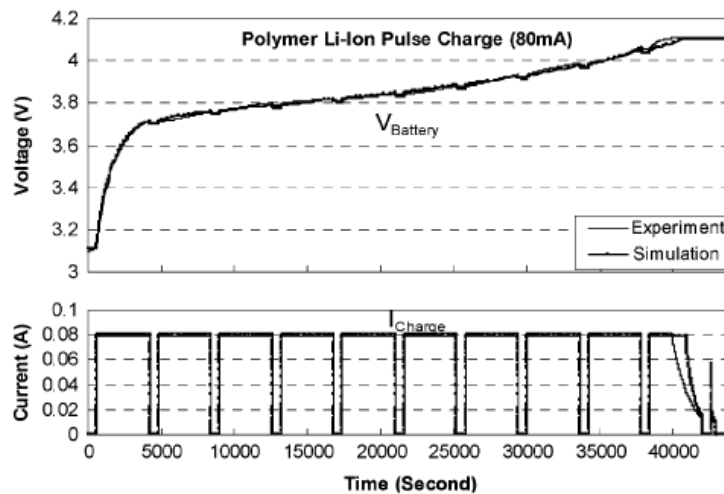
Siguiendo con nuestro objetivo de caracterizar el elemento capacitivo vamos a identificarlo. Para ello vamos a tener en cuenta las ecuaciones mostradas a continuación en la figura, con la lógica que llevan implícita.

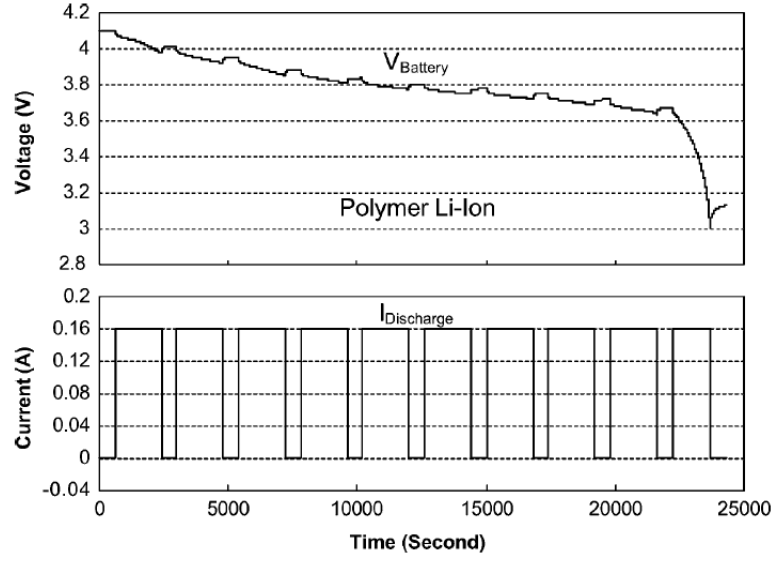
$$i = C \frac{dV}{dt} \Rightarrow \Delta V = \frac{1}{C} \int i dt \quad \left| \begin{array}{l} i = \frac{dq}{dt} \\ \Delta V = \frac{1}{C} \int dq = \frac{1}{C} \Delta Q \\ C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \end{array} \right.$$

Hallamos la capacidad del condensador, en función de los datos que conocemos, que hasta el momento son la tensión y el estado de carga que, dando un paso más, tiene relación directa con la variación de carga que tenga lugar, tal y como muestra la función de la figura, basándonos en la idea de que la carga total de la batería corresponde con el máximo estado de carga.

$$\Delta Q = \frac{\Delta SOC}{100} \cdot Q_T$$

La obtención de la carga total que almacena la batería es posible al conocer el perfil de carga de la batería, tanto en niveles de corriente como de tiempo. Estos datos los recuperamos haciendo uso de dos perfiles distintos de carga, obtenidos del artículo [], mostrados en la figura.





Teniendo una corriente de 80 mA, suministrada durante un tiempo total de 34.965s, calculado de la forma más precisa mediante interpolación de los datos de la gráfica es posible hallar la carga total. De igual forma calculamos un segundo valor de carga total tomando como datos 160 mA y 17.131 s, para disminuir posibles errores.

$$Q_{T1} = I \cdot \Delta t = 0,08 \text{ A} \cdot 37.391 \text{ s} = 2991,28 \text{ C}$$

$$Q_{T2} = I \cdot \Delta t = 0,16 \text{ A} \cdot 17.835 \text{ s} = 2853,60 \text{ C}$$

Una vez hallamos el valor de la carga total que dispone la batería, hemos de obtener el valor de la carga que corresponde al 80% del total, ya que es el rango entre los límites fijados, 10% y 90% del SOC, a los cuales, por tanto, pertenecen los límites de tensión proporcionados en párrafos anteriores. A continuación mostramos el cálculo de esta carga.

$$\Delta Q_{1_{80\% \Delta SOC}} = \frac{\Delta SOC}{100} \cdot Q_T = \frac{90\% - 10\%}{100} \cdot Q_{T1} = 2393,024 \text{ C}$$

$$\Delta Q_{2_{80\% \Delta SOC}} = \frac{\Delta SOC}{100} \cdot Q_T = \frac{90\% - 10\%}{100} \cdot Q_{T2} = 2282,880 \text{ C}$$

Sabiendo el diferencial de carga que supone un cambio del estado de carga del ochenta por ciento, solo queda hallar el valor de la capacidad que le corresponde al considerar la diferencia de tensión mostrada en la figura superior.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

$$C_1 = \frac{\Delta Q_{1_{SOC}}}{\Delta V} = \frac{2393,024 \text{ C}}{0,32 \text{ V}} = 7478,2 \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{\Delta Q_{2_{SOC}}}{\Delta V} = \frac{2282,880 \text{ C}}{0,32 \text{ V}} = 7134,0 \text{ F}$$

Se aprecia que el valor obtenido es desmesurado para la capacidad de un condensador real, pero hemos de saber que identifica un elemento de un modelo, no un componente real. Visto desde otra perspectiva, apreciando la ecuación que venimos usando para relacionar la tensión en circuito abierto y la carga y su correspondiente representación gráfica, mostrada en la figura, podemos ver que el inverso de la capacidad es el equivalente numérico a la pendiente de la gráfica. Se aprecia una pendiente muy pequeña, lo que si tiene lógica al razonar el gran valor de la capacidad obtenido

Hemos de decir que empleamos esta lógica en la caracterización del elemento capacitivo ya que es muy práctica al basarse en datos experimentales que pueden obtenerse fácilmente al introducir corriente a la batería que se esté probando, sin necesidad de conocer las características eléctricas de la batería. Sin embargo, en este caso, al poseer las especificaciones de la batería de prueba, es posible determinar la capacidad del elemento que representa a la batería mediante el valor de su capacidad en amperios hora, proporcionado en el datasheet. Al partir de la capacidad nominal propia de la batería es suficiente convertir este valor de unidades, de amperios-hora a faradios, siguiendo la relación que se muestra en la figura, en la que se ha de tener en cuenta que la unidad amperio-hora se equipara a la unidad de carga coulomb, puesto que se define un margen de tensión, definiendo siempre la tensión máxima y mínima de la batería. En este caso, seguimos teniendo en cuenta que trabajamos en un margen de un ochenta por ciento de la carga total, y por tanto se ha de rebajar esta capacidad aplicándole un factor de un 0.8. Por tanto, al tener una batería de 850mAh el valor del condensador se situaría a F.

$$\Delta Q_{80\% \Delta SOC_{teórico}} [C] = C_{nom} [Ah] \cdot \frac{3600s}{1 h} \cdot \frac{\Delta SOC}{100} = 0,85 Ah \cdot \frac{3600s}{1 h} \cdot 0,8 = 2448 C$$

$$C_{b_{teórica}} = \frac{\Delta Q_{80\% \Delta SOC_{teórico}}}{\Delta V} = 7650 F$$

Este cálculo teórico de la capacidad nos permite comprobar la validez de la caracterización experimental que hemos hecho anteriormente para el elemento capacitivo  $C_b$ . En la tabla se pueden ver los resultados obtenidos, se aprecia que éstos son relativamente próximos si tenemos en cuenta que la obtención de los datos experimentales los hemos realizado a partir de la gráfica, con el error correspondiente que conlleva.

Si entramos un poco más en profundidad, la capacidad obtenida teóricamente es superior al valor obtenido mediante los datos experimentales. Es un resultado muy lógico puesto que una batería siempre tenderá a disminuir su capacidad útil como bien hemos explicado. Es muy posible que la causa sea un pequeño deterioro, acumulación de ciclos de vida o incluso unas condiciones de temperatura que propicien una disminución de la capacidad útil en el momento en el que las pruebas hayan sido realizadas.

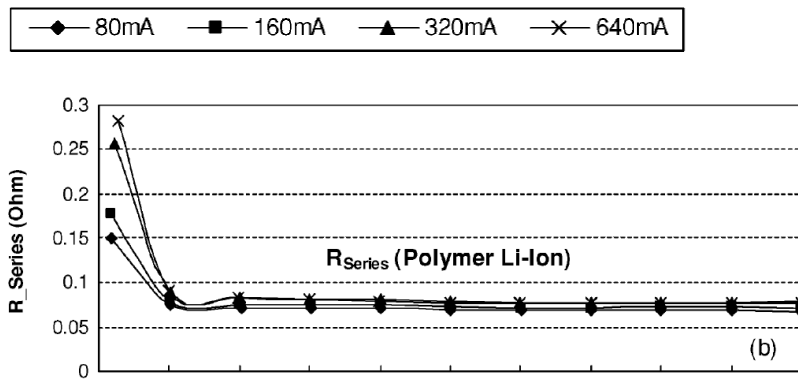
En la caracterización, como valor final consideraremos la media entre los dos valores experimentales, debido a que no siempre tendremos el valor nominal de la capacidad.

PARÁMETRO	VALOR
-----------	-------

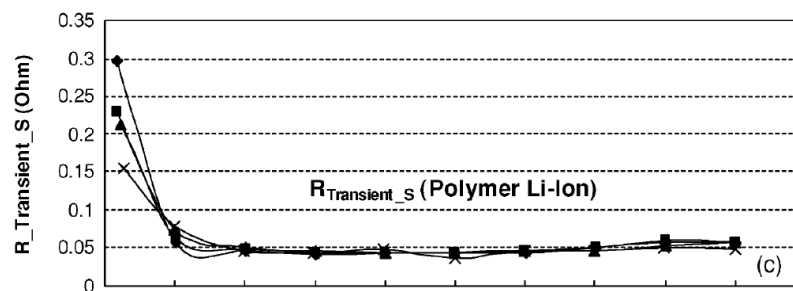


$C_{b\_experimental1}$	7479 F
$C_{b\_experimental2}$	7134 F
$C_{b\_teórica}$	7650 F
$C_{b\_final}$	7307 F

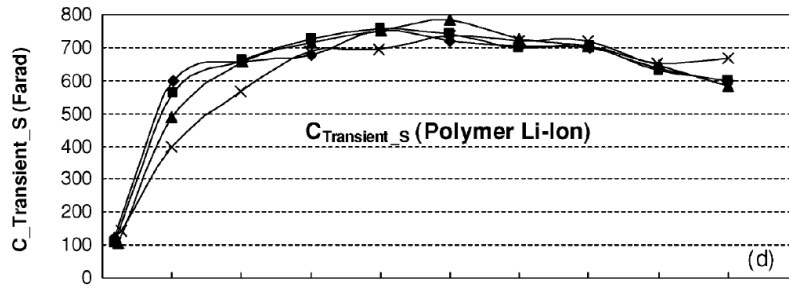
En cuanto a los elementos  $R_0$ ,  $C_f$ ,  $R_f$ ,  $C_s$  y  $R_s$ , vamos a obtenerlos a partir de mediciones experimentales en ciclos de descarga realizados a distintas corrientes, 80 mA, 160 mA, 320 mA y 640 mA y a una temperatura ambiente de 25°C. Las curvas correspondientes a estas mediciones, y las ecuaciones que las definen las vamos a tomar del artículo[1]. A continuación se muestra cada curva junto con la ecuación que la define. Destacar que todos los resultados están en función del estado de carga en el que se encuentre la batería. Además todas las curvas tienen como leyenda la mostrada en la figura que las precede.



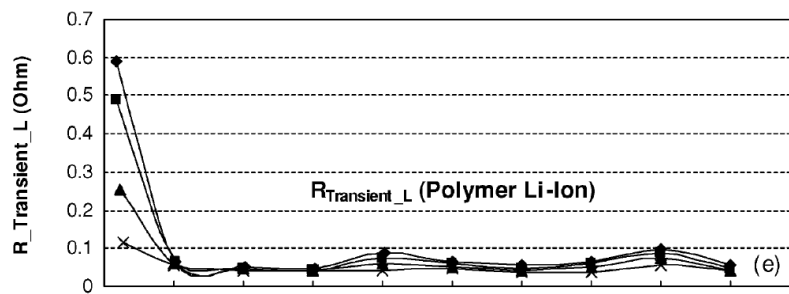
$$R_{Series}(SOC) = 0.1562 \cdot e^{-24.37 \cdot SOC} + 0.07446$$



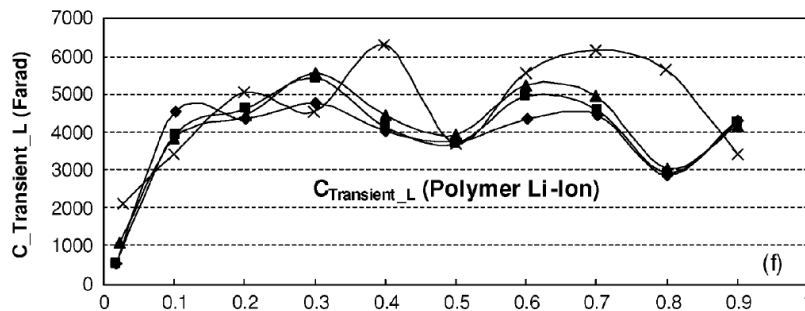
$$R_{Transient\_S}(SOC) = 0.3208 \cdot e^{-29.14 \cdot SOC} + 0.04669$$



$$C_{\text{Transient\_S}}(\text{SOC}) = -752.9 \cdot e^{-13.51 \cdot \text{SOC}} + 703.6$$



$$R_{\text{Transient\_L}}(\text{SOC}) = 6.603 \cdot e^{-155.2 \cdot \text{SOC}} + 0.04984$$



$$C_{\text{Transient\_L}}(\text{SOC}) = -6056 \cdot e^{-27.12 \cdot \text{SOC}} + 4475.$$

Analizando los datos gráficos se puede afirmar que siempre y cuando el estado de carga de la batería se encuentre dentro del 10% y el 90%, los componentes tendrán un comportamiento uniforme, por tanto asumiremos que dichos elementos van a tener un valor constante. Para mayor precisión calculamos los valores de cada componente cuando el SOC se encuentra a 10%, 30%, 50%, 70% y 90% y hacemos la media entre los cinco valores. El resultado de esta media es el valor que asumiremos para cada componente. En la tabla se muestran los resultados obtenidos. Inicialmente los datos se obtuvieron como media de los valores correspondientes a los niveles de SOC de 10, 50 y 90 %. El problema recaía en que al 10% los componentes varían mucho, pero sólo de forma puntual, pronto adquieren una relativa estabilización. Por tanto, al tomar solo datos en tres niveles de carga, el valor puntual afectaba significativamente al valor medio tomado como dato final, alejándolo de ser preciso. Por esta razón se aumenta el número de valores reales tomados a cinco.

	SOC 10%	SOC 30%	SOC 50%	SOC 70%	SOC 90%	Valor medio
$R_0$	0,08811 $\Omega$	0,07456 $\Omega$	0,07446 $\Omega$	0,07446 $\Omega$	0,07446 $\Omega$	0,07721 $\Omega$
$C_f$	508,6 F	690,5 F	702,7 F	703,5 F	703,6 F	661,78 F
$R_f$	0,06409 $\Omega$	0,04674 $\Omega$	0,04669 $\Omega$	0,04669 $\Omega$	0,04669 $\Omega$	0,05018 $\Omega$
$C_s$	4073 F	4473 F	4475 F	4475 F	4475 F	4394 F
$R_s$	0,04984 $\Omega$	0,04984 $\Omega$	0,04984 $\Omega$	0,04984 $\Omega$	0,04984 $\Omega$	0,04984 $\Omega$

Un detalle muy importante que se ha de tener en cuenta es que la tensión en circuito abierto viene definida por el nivel de carga de la batería. El modelo propuesto permite cuantificar la variación de  $V_{OC}$  que tiene lugar, pero no da la posibilidad de calcular el nivel exacto de tensión que hay. Por este motivo para que el modelo esté totalmente caracterizado, se ha de definir como precondition, el estado inicial de carga en el que se encuentra la batería.

Finalmente, tras todas las estimaciones, el modelo queda caracterizado por los valores mostrados en la tabla.

PARÁMETRO	VALOR
$I_b$	Entrada del sistema
$SOC_0$	Precondición aportada por el usuario
$C_b$	7307 F
$R_0$	0,07721 $\Omega$
$C_f$	661,78 F
$R_f$	0,05018 $\Omega$
$C_s$	4394 F
$R_s$	0,04984 $\Omega$

## 6.4 Adaptación modelo unitario/modelo batería

Una vez se tiene caracterizado el modelo para una batería con unas especificaciones concretas, en nuestro caso una batería de ión litio con una capacidad de 850 mAh y una tensión nominal de 3,7 v, el objetivo es conseguir extrapolar dichos resultados de forma que se obtenga un modelo capaz de simular el comportamiento de cualquier batería, en función de su capacidad y tensión. Así, a partir de las especificaciones relativas a la batería del vehículo eléctrico en estudio, será posible conocer el comportamiento que tendrá el sistema de almacenamiento. Además mediante las simulaciones oportunas, realizadas en el siguiente apartado, se estimará la energía que éste pone a disposición para la alimentación del vehículo.

A la hora de realizar esta extrapolación tomamos como unidad básica el modelo ya caracterizado, unidad válida para una batería de 0,85 mAh y 3,7 v. A partir de dicha unidad, estudiaremos como se transforman los parámetros de modelo inicial al colocar conjuntos de unidades en serie y en paralelo, para así poder obtener el modelo para baterías de distintos niveles de capacidad y tensión.

Inicialmente estudiaremos la variación de los parámetros en función del número de baterías que coloquemos en serie, relación que nos permitirá versatilidad desde el punto de vista de la tensión, ya que cuando varias baterías se colocan en serie se multiplica el valor de la tensión.

Posteriormente analizaremos cómo se comportan los componentes del modelo en función del número de baterías que coloquemos en paralelo. Al colocar sistemas de almacenamiento capacitivos en paralelo la capacidad del conjunto se multiplica en relación al número de unidades colocadas. De este modo los valores de los parámetros se podrán hallar partiendo de los parámetros iniciales y en función de la capacidad que se desee. Combinando ambas relaciones a la hora de calcular los parámetros del circuito, podremos aplicar finalmente el modelo a la batería que deseemos, definiendo el número de baterías en serie y en paralelo en función de la capacidad y tensión que tenga la batería a modelar, respectivamente.

En la figura, se observa un equivalente muy simplificado del modelo hallado en el apartado anterior, compuesto por una fuente de tensión y una capacidad, que representan la tensión en circuito abierto y la carga de la batería respectivamente, además de la impedancia total de todos los componentes resistivos y capacitivos.

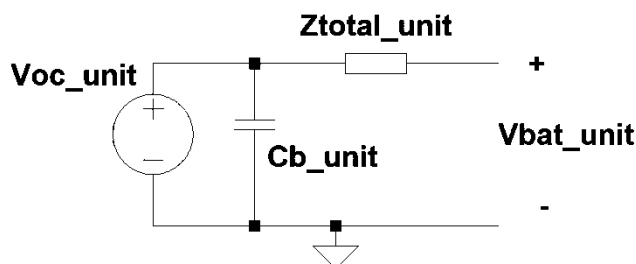
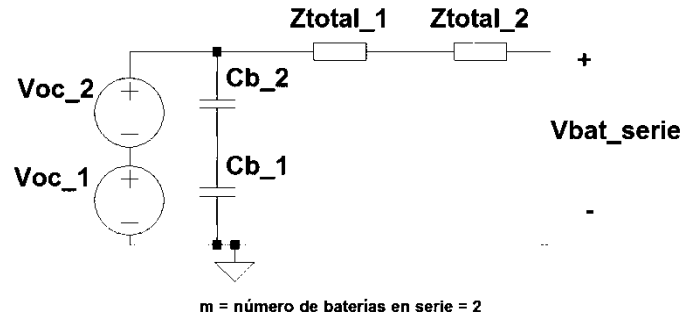
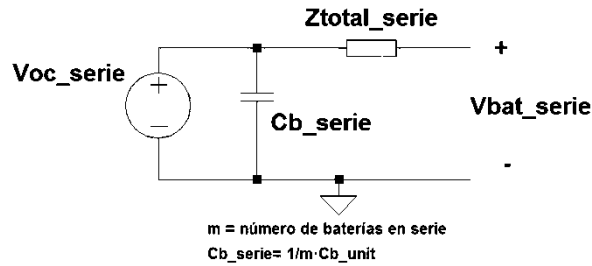


Fig. 19- Modelo electroquímico basado en impedancias

Se toman como parámetros unitarios, indicados con subíndice ‘unit’, los valores del modelo hallado en el apartado anterior, denominado como modelo unitario, para una sola unidad de almacenamiento, se 850 mAh, ya caracterizada anteriormente. En la misma línea la colocación de un conjunto de unidades en serie  $m$  genera un sistema con un circuito equivalente tal y como el mostrado en la figura, el cual puede ser simplificado tal y como se muestra en la figura.

Fig. 20- Esquemático de  $m=2$  baterías en serieFig. 21- Esquemático simplificado de  $m=2$  baterías en serie

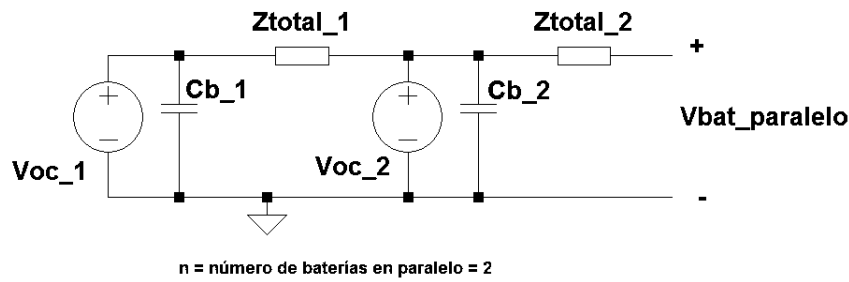
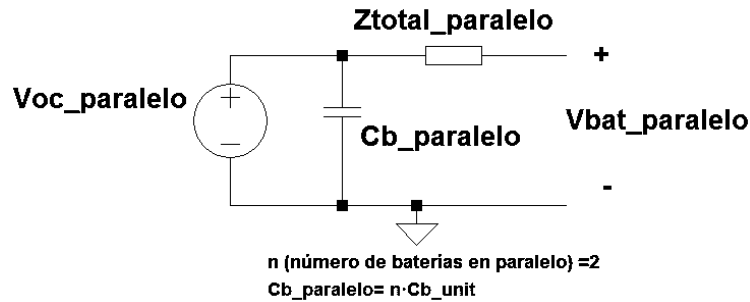
Se asume que las baterías unidas en estas pruebas de extrapolación, tanto en serie como en paralelo, poseen todas las mismas características de tensión capacidad e impedancia, las propias de la batería analizada en profundidad en el apartado anterior, en el que se han proporcionado sus valores. La relación entre el modelo unitario y el modelo de un número de baterías  $m$  colocadas en serie viene dada por las ecuaciones que se muestran a continuación.

$$V_{OC\_serie} = m \cdot V_{oc\_unit}$$

$$Z_{total\_serie} = m \cdot Z_{total\_unit}$$

$$C_{b\_serie} = \frac{1}{m} \cdot C_{b\_unit}$$

De forma homóloga se calcula la relación entre el modelo unitario y un modelo aplicable a un número  $n$  de baterías interconectadas en paralelo. Las figuras muestran los esquemáticos de la conexión de la batería.

Fig. 22- Esquemático de  $n=2$  baterías en paraleloFig. 23- Esquemático simplificado de  $n=2$  baterías en paralelo

$$V_{OC\_paralelo} = V_{oc\_unit}$$

$$Z_{total\_paralelo} = \frac{1}{n} \cdot Z_{total\_unit}$$

$$C_{b\_paralelo} = n \cdot C_{b\_unit}$$

Como resultado final podemos obtener un modelo, dependiente del número de baterías por filas y columnas que conformen el módulo de baterías. En la figura se puede la solución hallada. El número de celdas y columnas será hallado en función de la tensión y la capacidad propias del módulo de baterías analizado. Las ecuaciones (), () y () definen dicho modelo.

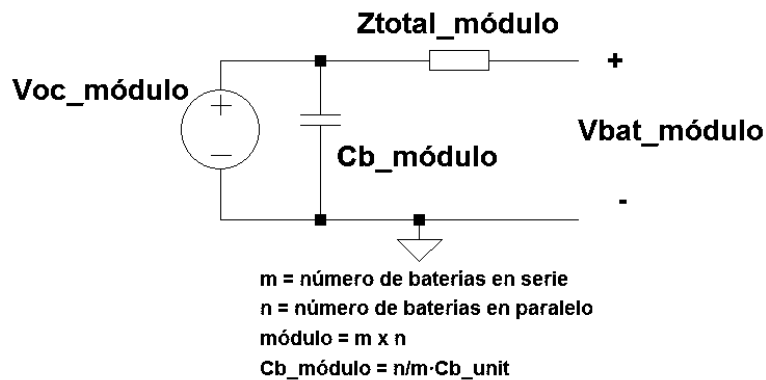


Fig. 24- Esquemático de un módulo de baterías

$$V_{OC\_módulo} = m \cdot V_{oc\_unit}$$

$$Z_{total\_módulo} = \frac{m}{n} \cdot Z_{total\_unit}$$

$$C_{b\_módulo} = \frac{n}{m} \cdot C_{b\_unit}$$

Este modelo final será el que se usa para reproducir el comportamiento de la batería eléctrica, ya que permite predecir el comportamiento de cualquier batería, definiendo el modelo en función del número de celdas puestas en serie o en paralelo, en función de la tensión y capacidad de la batería a modelar

# Capítulo 8

## Trabajos futuros y mejoras

### 7.1 Trabajos futuros y Mejoras

Hace escasos meses, a lo sumo algún año, se han creado las baterías de grafeno, un importante descubrimiento para el mundo de la tecnología, y en concreto para el continuo desarrollo y mejora del vehículo eléctrico. Las propiedades que se han descubierto hasta el momento son muy exitosas, otorgándoles una potencia triple en comparación con las baterías de ión-litio y un precio cuatro veces inferior al de estas últimas. Además tienen la capacidad de cargarse a mayor velocidad. El presente trabajo fin de grado no se ha basado en este tipo de baterías debido a que están en plena investigación, desconociéndose todavía muchos de sus aspectos, pero se prevé que irrumpirán en el mercado con gran fuerza [24]. En caso de ser así, se propone realizar el análisis desarrollado en esta memoria enfocándolo a las baterías de grafeno, con el fin de adecuarnos constantemente a las innovaciones y necesidades del mercado. El estudio de las baterías de grafeno sería profundo pero partir de esta memoria facilitaría en gran parte el trabajo.

Pero hasta el momento que eso ocurra se proponen como futuros trabajos llevar a cabo el balance de energía tomando como sistema la moto eléctrica, tal como fue explicado en el marco de trabajo, teniendo en cuenta la energía que dispone la batería para alimentar la moto y la energía que se requiere para realizar recorridos más extensos que los estimados en este trabajo.





# Glosario

TFG	<i>Trabajo Fin de Grado</i>
SOC	<i>State Of Charge – Estado de carga</i>
SOH	<i>State Of Health – Estado de salud</i>
OCV	<i>Open Circuit Voltage – Tensión en circuito abierto</i>
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopic</i>
DOD	<i>Depth Of Discharge – Profundidad de descarga</i>
SOD	<i>State Of Discharge – Estado de descarga</i>
ITC	<i>Instrucción técnica complementaria</i>

# Referencias

- [1] <https://www.ieee.org/index.html>
- [2] <http://www.investinspain.org/invest/wcm/idc/groups/public/documents/documento/mda0/ndk4/~edisp/4498055.pdf>
- [3] <http://www.boe.es/boe/dias/2014/12/31/pdfs/BOE-A-2014-13681.pdf>
- [4] <http://www.madrid.org/bdccc/normativa/PDF/Instalaciones/Instalaciones%20electricas/Normas%20Tratadas/ESRd084202.pdf>
- [5] [endrino.pntic.mec.es/jvah0004/?download=Baterias.pdf](http://endrino.pntic.mec.es/jvah0004/?download=Baterias.pdf)
- [6] S.P. Castaño Solís, Modelado y caracterización funcional en régimen dinámico de sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía. Aplicación a supercondensadores y baterías de iones de litio, 2014
- [7] Shafiei, A. Momeni y S. Williamson, Battery modeling approaches and management techniques for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE, pp. 1- 5, 2011.
- [8] ]K. Lahiri, A. Raghunath, S. Dey y D. Panigrahi, Battery-driven system design: a new frontier in low power design, Design Automation Conference, 2002. Proceedings of ASP-DAC 2002. 7th Asia and South Pacific and the 15th International Conference on VLSI Design. Proceedings., pp. 261- 267, 2002.
- [9] K. Tsang, W. Chan, Y. K. Wong y L. Sun, Lithium-ion battery models for computer simulation, Automation and Logistics (ICAL), 2010 IEEE International Conference on, pp. 98 - 102 , 2010.

- 
- [10] D. Panigrahi, C. Chiasserini, S. Dey y R. Rao, «Battery life estimation of mobile embedded systems,» Fourteenth International Conference on VLSI Design, p. 57–63, 2001.
  - [11] J.R. Bumby, P.H. Clarke, and I. Forster; "Computer modeling of the automotive energy requirements for internal combustion engine and battery electric-powered vehicles," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 132, no. 5, pp. 265-279, Sep., 1985.
  - [12] Lijun Gao, Roger A. Dougal, Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation, 2002
  - [13] Ari Hentunen, Teemu Lehmuspelto, Jussi Suomela, Time-Domain Parameter Extraction Method for Thevenin-Equivalent Circuit Battery Models, 2014
  - [14] S. Abu-Sharkh, D. Doerffel, Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries, J. Power Sources, vol. 130, pp. 266–274, 2004.
  - [15] Praveen Palacharla, Santosh Bangaru, Rajani Alugonda, Modeling and Simulation of Lithium-ion Battery with Hysteresis for Industrial Applications, 2013
  - [16] Arash Shafiei, Ahmadsreza Momeni, Sheldon S. Williamson, Battery Modeling Approaches and Management Techniques for Plug-in Hybrid Electric Vehicles .- 2011
  - [17] Ramamurthy, A.; Notani, S.; Bhattacharya, S.; , Advanced lithium ion battery modeling and power stage integration technique, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , vol., no.pp.1485-1492, 12-16 Sept. 2010
  - [18] A123 Systems, High Power Lithium Ion, ANR26650m1, Datasheet.
  - [19] Dong Bing, TianYantao, ZhouChangjiu One Estimating Method of the State of Charge of Power Battery for Electronic Vehicle, 2014
  - [20] Feng Leng, Cher Ming, Michael Pecht, JiYe Zhanga The effect of temperature on the electrochemistry in Lithium-ion batteries, 2014
  - [21] U.Iraola, I.Aizpuru, J.M.Canales, A.Etxeberria, I.Gil, Methodology for thermal modelling of lithium-ion batteries 2013
  - [22] Ala A. Hussein Capacity Fade Estimation in Electric Vehicles Li-ion Batteries using Artificial Neural Networks
  - [23] Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V PerformanceMin Chen, Gabriel A. Rincon-Mora, 2006
  - [24] <http://todoproductividad.blogspot.com.es/2011/02/como-calcular-la-capacidad-de-las.html>

# **Anexos**

# Anexo A: Presupuesto

A continuación se detalla minuciosamente el tiempo invertido en el desarrollo del presente trabajo fin de grado, así como las tareas en la que dicho tiempo ha sido aplicado. Este anexo permite dar a conocer los detalles del hilo de trabajo seguido, además del esfuerzo requerido. Actuará como base para poder cuantificar el coste económico que supone el proyecto realizado.

## 1. Organización del tiempo

El desarrollo total ha sido dividido en fases para una mejor planificación del trabajo y una total focalización en los temas concretos a tratar. Cada etapa es detallada a continuación, mostrándose el resultado total en la tabla .

### ***Etapas 1: Documentación inicial***

- a. Análisis y estudio del problema (18 horas)
- b. Documentación y estudio de características y funcionamiento de baterías de ión-litio (120 horas)
- c. Familiarización con las herramientas de búsqueda y simulación (20 horas)
- d. Familiarización con la lengua usada en la documentación (20 horas)

### ***Etapas 2: Documentación en profundidad***

- a. Recopilación de artículos y tesis (40 horas)
- b. Comprensión y análisis de documentos recopilados (115 horas)
- c. Comparación y selección de artículos en función de relevancia (50 horas)
- d. Toma de conclusiones y decisión de la solución propuesta (25 horas)

### ***Etapas 3: Proposición modelo y simulaciones***

- a. Análisis del modelo propuesto y su aplicación (25 horas)
- b. Identificación de los parámetros del modelo (25 horas)

### ***Etapas 4: Desarrollo de la memoria***

- a. Escritura de la memoria (120 horas)
- b. Reuniones con el tutor (8 horas)

**Recuento de horas**

<b>ETAPAS</b>	<b>TIEMPO EMPLEADO [horas]</b>
Documentación inicial	178
Documentación en profundidad	230
Proposición modelo	60
Desarrollo de la memoria	128
<b>TOTAL</b>	<b>596</b>

## 2. Presupuesto del Trabajo Fin de Grado

### 2.1. Costes materiales

No se han requerido muchos materiales ni herramientas para la realización del trabajo mostrado, ha sido desarrollado en toda su totalidad haciendo uno de un ordenador, el cual debe ser incluido como coste. Se considera una amortización estándar del equipo de aproximadamente tres años y un coste total de 1000 €. Teniendo en cuenta el número de horas invertidas detalladas en la tabla, se estima un coste de material de 99,33 €.

En referencia a la herramienta de simulación usada, el software LTSpice IV, no ha supuesto ningún coste adicional, ya que se trata de un software libre, que el creador pone gratuitamente a disposición en la web.

### 2.2. Costes de personal

El proyecto ha sido llevado a cabo por un único individuo, el cual ha desarrollado el global de tareas de cada etapa y es considerado profesionalmente como un ingeniero, lo que supone un coste total tal y como el mostrado en la tabla.

<b>PERSONAL</b>	<b>TIEMPO EMPLEADO [horas]</b>	<b>PRECIO/HORA</b>	<b>PRECIO</b>
Ingeniero	596	10 € /hora	5960 €
<b>TOTAL</b>			<b>5960 €</b>

---

## 2.3. Costes totales

A la suma de los costes calculados ha de añadirse el Impuesto sobre el Valor Añadido, actualmente situado en un porcentaje de un 21%. En la tabla se aprecia la obtención del coste final. su totalidad el proyecto implica un coste de

CONCEPTO	PRECIO [€]
Costes materiales	99,33 €
Costes de personal	5960 €
Subtotal	6059,33 €
IVA : 21%	1272,46 €
<b>TOTAL</b>	<b>7331,79 €</b>

La totalidad del proyecto implica un coste de **7331,79 €**

En \_\_\_\_\_, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_.

El ingeniero